



EMANUEL VICTOR DA SILVA

**ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE CORREIAS
TRANSPORTADORAS PARA APLICAÇÕES EM
MINERAÇÃO**

**LAVRAS – MG
2022**

EMANUEL VICTOR DA SILVA

**ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE CORREIAS TRANSPORTADORAS PARA
APLICAÇÕES EM MINERAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Curso de Engenharia Mecânica, para
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Henrique Leandro Silveira
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Emanuel Victor da.

Estudo e dimensionamento de correias transportadoras para
aplicações em mineração / Emanuel Victor da Silva. - 2023.

98 p. : il.

Orientador(a): Henrique Leandro Silveira.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Equipamento de transporte. 2. Método CEMA. 3. Mineração.
I. Silveira, Henrique Leandro. II. Título.

EMANUEL VICTOR DA SILVA

**ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE CORREIAS TRANSPORTADORAS PARA
APLICAÇÕES EM MINERAÇÃO
STUDY AND SIZING OF CONVEYOR BELTS FOR MINING APPLICATIONS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Curso de Engenharia Mecânica, para
obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 06 de março de 2023.
Prof. Dr. Henrique Leandro Silveira - UFLA
Prof. Dr. Filipe Augusto Gaio de Oliveira - UFLA
Prof. Dr. Mauricio Francisco Caliri Júnior - UFLA

Prof. Dr. Henrique Leandro Silveira
Orientador

**LAVRAS – MG
2022**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama com as principais operações unitárias do tratamento de minério.....	6
Figura 2 - Fluxograma da Usina de Beneficiamento da Mina do Sapo.....	7
Figura 3 - Fluxograma de uma linha de processo de usina de concentração da Samarco.....	7
Figura 4 - Britador de mandíbula	8
Figura 5 - Corte esquemático de um britador de mandíbulas.....	9
Figura 6 - Britador giratório e britador cônico	10
Figura 7 - Britador Cônico	11
Figura 8 - Britador giratório	12
Figura 9 - Moinho cilíndrico	13
Figura 10 - Moinho cilíndrico	14
Figura 11 - Diferentes modelos de peneiras	15
Figura 12 - Modelo de funcionamento de um hidrociclone	16
Figura 13 - Conjunto de hidrociclones	17
Figura 14 - Perfil em corte de um hidrociclone.....	18
Figura 15 - Classificador de espiral (Adaptado).....	19
Figura 16 - Classificador espiral.....	19
Figura 17 - Classificador de espirais (Por gravidade)	20
Figura 18 - Estrutura de um separador magnético (1: Sistema magnético permanente 2: Tambor giratório, 3: Calha de separação, 4: Tanque de alimentação, 5: Tubulação de descarga)	21
Figura 19 - Modelo de separador magnético	22
Figura 20 - Jigue	23
Figura 21 - Esquema de trabalho de um jigue	23
Figura 22 - Componentes de uma correia transportadora.....	25
Figura 23 - Correias transportadoras	26
Figura 24 - Modelos de alimentadores de cascata.....	28
Figura 25 - Alimentador primário	28
Figura 26 - Alimentadores vibratórios.....	29
Figura 27 - Sistema de acionamento composto por um motor, acoplamento hidrodinâmico e redutor, montado em sua base	29
Figura 28 - Tipos de tambores (lisos e revestidos à esquerda, aletado à direita)	31
Figura 29 - Tambor de acionamento.....	31
Figura 30 - Correia sendo alocada no transportador.....	32
Figura 31 - Componentes básicos de uma correia transportadora.....	33
Figura 32 - Roletes diversos: 1 – Rolete de retorno plano com rolo metálico (apoiado); 2 – Rolete de retorno plano com rolo metálico (Suspensão); 3 – Rolete de carga triplo ou retorno triplo; 4 – Rolete de retorno plano com anéis de borracha (Suspensão); 5 – Rolete.....	34
Figura 33 - Vista interna do rolete.....	35
Figura 34 - Roletes diversos	35
Figura 35 - Raspadores de correia transportadora	36
Figura 36 - Raspador de correia	37
Figura 37- Limpadores de correia em V e diagonal	37

Figura 38 - Barragem de rejeitos feita por método a montante (Adaptado).....	39
Figura 39 - Barragem de rejeitos da Vale realizada por método a montante	40
Figura 40 - Fluxograma das etapas de cálculo para dimensionamento do equipamento	42
Figura 41 - Parâmetros descritivos das características de trabalho de roletes.....	43
Figura 42 - Trapézio de referência para o dimensionamento da correia transportadora	46
Figura 43 - Fator de correção de temperatura (Ft) em Farenheit.....	56
Figura 44 - Consumo de potência por elemento de tensão.....	74
Figura 45 - Modelo do motor utilizado no equipamento.....	75
Figura 46 - Especificações do motor utilizado no transportador.....	75
Figura 47 - Especificações do redutor no transportador.....	76
Figura 48 - Relação velocidade média x Potência requerida	80
Figura 49 -Relação do consumo de potência com a vazão do transportador	81
Figura 50 - Relação do consumo de potência com a inclinação do equipamento	82
Figura 51 - Relação de gasto energético com a variação de espaçamento dos roletes.....	83
Figura 52 - Relação da largura da correia com a potência consumida e peso do material “Wm” sobre a mesma	84
Figura 53 - Relação entre densidade, potência consumida e velocidade mínima do equipamento	86
Figura 54 - Relação entre potência e comprimento do transportador.....	87
Figura 55 - Impacto da vazão e inclinação na potência consumida	89
Figura 56 - Impacto entre velocidade e largura da correia na potência consumida	90
Figura 57 - Impacto da vazão e largura da correia na potência consumida.....	91
Figura 58 - Impacto da densidade do material transportado e largura da correia na potência consumida.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Transportadores	24
Tabela 2 - Capacidade volumétrica dos transportadores (C). m ³ /h a 1,0 m/s.....	44
Tabela 3 - Variação dos ângulos de carga e repouso de acordo com o fluxo de material.....	45
Tabela 4 - Velocidade máxima da correia transportadora em função do material transportado da largura da correia	46
Tabela 5 - Fator referente a granulometria máxima do grão (K1).....	50
Tabela 6 - Capacidade de carga [lb] em função do ângulo de passagem (Ângulo de inclinação dos roletes (β)) e largura da correia e tipo de roletes (Série C) [lb] (Capacidades baseadas em uma vida mínima de 30.000 horas a 500 rpm)	51
Tabela 7 - Classificação de roletes	52
Tabela 8 - Espaçamento de roletes devido às condições de operação.....	53
Tabela 9 – Peso estimado da correia [lb/ft] em função da densidade do material transportado e da largura da correia	54
Tabela 10 - Fator de carga K_y	58
Tabela 11 - Tensão necessária para girar os tambores	59
Tabela 12 - Coeficiente de atrito entre guia e material.....	61
Tabela 13 - Força necessária para vencer o atrito dos limpadores de correia	62
Tabela 14 - Variáveis calculadas e parâmetro fixados para o protótipo.....	73
Tabela 15 - Relação entre inclinação e vazão com o consumo de potência (kW)	88
Tabela 16 - Relação entre largura da correia e velocidade com o consumo de potência (kW)	90
Tabela 17 - Relação entre densidade do material transportado e largura da correia com o consumo de potência (kW).....	91

RESUMO

As correias transportadoras são equipamentos relevantes nas mineradoras, pois é um dos meios mais eficientes de permitir o transporte dos materiais através da planta industrial. Os custos que elas estão expostas em relação a componentes, consumo e manutenção as tornam mais importantes do ponto de vista econômico. O método CEMA (*Conveyor Equipment Manufacturers Association*) consiste em uma das normas que rege o projeto de equipamentos como esses. É uma sequência de equações que serão utilizadas para validação de um transportador, utilizando engenharia reversa. Dessa forma, este trabalho busca analisar o projeto de uma correia transportadora implementada em uma mineradora por meio das especificações de CEMA, além de avaliar o impacto dos diversos componentes do sistema na demanda de potência de acionamento. Todo o equacionamento presente no CEMA é realizado para um equipamento específico. Em paralelo, é discutido o impacto dos diferentes parâmetros e componentes presentes em um transportador no consumo de potência. Com isso o trabalho apresenta diferentes cenários para facilitar e viabilizar projetos desse tipo e confirma o correto dimensionamento do transportador estudado com a norma especificada.

Palavras-Chave: Equipamento de transporte. CEMA. Mineradoras.

ABSTRACT

Conveyor belts are relevant equipment in mining companies, as it is one of the most efficient means of allowing the transport of materials through the industrial plant. The costs they are exposed to in terms of components, consumption and maintenance make them more important from an economic point of view. The CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association) method is one of the standards that governs the design of such equipment. It is a sequence of equations that will be used to validate a conveyor, using reverse engineering. Thus, this work seeks to analyze the design of a conveyor belt implemented in a mining company through the CEMA specifications, in addition to evaluating the impact of the various components of the system on the drive power demand. All the equations present in CEMA are performed for a specific piece of equipment. In parallel, the impact of different parameters and components present in a conveyor on power consumption is discussed. With this, the work presents different scenarios to facilitate and make feasible projects of this type and confirms the correct sizing of the conveyor studied with the specified standard.

Keywords: Transport equipment. CEMA. Mining.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.2 Objetivos gerais	2
1.1.3 Objetivos específicos.....	2
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Contexto da mineração no Brasil.....	3
2.2 Beneficiamento de minério	4
2.2.1 <i>Estágios e equipamentos do processo de beneficiamento</i>	8
2.2.1.1 <i>Britagem e britadores</i>	8
2.2.1.2 <i>Moagem</i>	12
2.2.1.3 <i>Peneiramento</i>	14
2.2.1.4 <i>Classificação</i>	15
2.2.1.5 <i>Mecanismos de transportes de sólidos</i>	24
2.2.1.6 <i>Alimentador</i>	27
2.2.1.7 <i>Sistema de acionamento</i>	29
2.2.1.8 <i>Tambores</i>	30
2.2.1.9 <i>Correia</i>	32
2.2.1.10 <i>Roletes</i>	33
2.2.1.11 <i>Acessórios de limpeza</i>	36
2.2.2 <i>Processos e equipamentos auxiliares</i>	38
2.2.2.1 <i>Mineroduto</i>	38
2.2.2.2 <i>Bombeamento de material</i>	38
2.2.2.3 <i>Tubulações e acessórios</i>	38
2.2.2.4 <i>Espessamento</i>	39
2.3 Barragens e novas tecnologias de deposição de rejeitos.....	39
2.4 Método CEMA	40
3 METODOLOGIA	41
3.1 Dimensionamento da esteira.....	41
3.2 Seleção e espaçamento de roletes	49

3.2.1	<i>Carga aplicada no rolete</i>	49
3.2.2	<i>Classificação de roletes</i>	51
3.2.3	<i>Espaçamento de roletes</i>	52
3.3	Peso estimado da correia	53
3.4	Cálculo de tensão efetiva da correia	55
3.4.1	<i>Tensão devido ao atrito entre a correia e os roletes (T_x)</i>	55
3.4.2	<i>Tensão devido a resistência à flexão da correia em contato com os roletes (T_{yb}) [lbs]</i> 57	
3.4.3	<i>Tensão devido à resistência à flexão do material transportado conforme se move pelos roletes (T_{ym})</i>	58
3.4.4	<i>Tensão relativa à elevação do material (T_m)</i>	59
3.4.5	<i>Tensão resultante do dobramento da correia e ao atrito do eixo do tambor com o mancal (T_p)</i>	59
3.4.6	<i>Tensão do impacto do material com a correia no carregamento (T_{am})</i>	60
3.4.7	<i>Tensões devido aos acessórios do transportador (T_{ac})</i>	60
3.5	Cálculo de flexão da correia entre os roletes (SAG)	62
3.6	Cálculo da potência requerida	63
3.7	Torque de acionamento	63
3.8	Discussão sobre a metodologia	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1	Estudo da potência consumida pela correia transportadora	65
4.1.1	<i>Parâmetros de funcionamento do equipamento</i>	65
4.1.2	<i>Velocidades do equipamento</i>	66
4.1.3	<i>Seleção de roletes</i>	67
4.1.4	<i>Cálculo do peso do material (W_m)</i>	68
4.1.5	<i>Carga aplicada nos rolos de carga (CR_c)</i>	68
4.1.6	<i>Carga aplicada nos rolos de retorno (CR_r)</i>	68
4.1.7	<i>Validação dos roletes utilizados</i>	69
4.2	Cálculo da tensão efetiva na correia	69
4.2.1	<i>Fator de temperatura K_t</i>	69
4.2.2	<i>Fator de correção K_x</i>	69
4.2.3	<i>Tensão devido ao atrito da correia em contato com os roletes (T_x)</i>	70
4.2.4	<i>Tensão devido à resistência à flexão da correia em contato com os roletes (T_{yb})</i>	70
4.2.5	<i>Tensão devido à resistência à flexão do material conforme ele se move sobre os roletes (T_{ym})</i>	70

4.2.6	<i>Tensão relativa à elevação do material (T_m)</i>	70
4.2.7	<i>Tensão resultante do dobramento da correia e ao atrito do eixo do tambor com o mancal (T_p)</i>	70
4.2.8	<i>Tensões devido aos acessórios do transportador (T_{ac})</i>	71
4.2.9	<i>Tensão resultante da aceleração do material com a correia (T_{am})</i>	71
4.2.10	<i>Cálculo de flexão da correia entre os roletes (SAG)</i>	72
4.3	Cálculo da potência requerida	72
4.4	Estudo do motor e redutor aplicado no equipamento	72
4.4.1	<i>Resumo dos resultados calculados</i>	72
4.4.2	<i>Estudo do motor utilizado no transportador</i>	74
4.4.3	<i>Estudo do redutor utilizado no transportador</i>	75
4.4.4	<i>Análise do torque de acionamento</i>	77
4.5	Estudos da relação entre potência e os parâmetros de operação	78
4.5.1	<i>Impacto da velocidade na potência</i>	79
4.5.2	<i>Influência da vazão na potência</i>	80
4.5.3	<i>Efeito da inclinação do transportador na potência</i>	81
4.5.4	<i>Relação entre potência e espaçamento dos roletes</i>	83
4.5.5	<i>Consequência da largura da correia na potência</i>	84
4.5.6	<i>Impacto das características do material na potência</i>	85
4.5.7	<i>Implicação entre o comprimento do transportador e a potência</i>	86
4.5.8	<i>Variação da potência em função da vazão e inclinação do transportador</i>	87
4.5.9	<i>Variação da potência em função da velocidade e largura da correia</i>	89
4.5.10	<i>Variação da potência em função da densidade e largura da correia</i>	91
5	CONCLUSÃO	93
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

As linhas de produção das empresas necessitam de transporte do produto entre as diferentes operações. Os meios de transporte utilizados variam de acordo com os tipos de materiais e trabalhos realizados. As correias transportadoras são um dos instrumentos empregados na execução desse tipo de função e ficaram em evidência na revolução criada por Henry Ford nos processos de produção, deixando-os mais ágeis.

As correias transportadoras podem ser encontradas em empresas do ramo alimentício para transporte de garrafas, por exemplo. Estão presentes também em linhas de produção de veículos ou produtos agrícolas. No entanto, são nas empresas mineradoras que esse sistema transportador tem grande visibilidade. No contato inicial com a área de mineração fica evidente o grande porte e número de correias transportadoras carregando os materiais entre várias operações unitárias com uma finalidade específica.

O desconhecimento desse equipamento leva muitas pessoas a tratarem as esteiras como algo simples e de baixo custo, porém a simplicidade se contrapõe aos vários dispositivos principais e auxiliares constituintes de uma correia transportadora. Dispositivos estes que contribuem fortemente nos custos com materiais das empresas e que podem impactar drasticamente no andamento das operações de produção. Em comparação com outros instrumentos de transporte, esse é realmente um dos que apresenta melhor custo benefício, o que não o impede de ser relativamente caro quando sujeito a ingerência das atividades de manutenção.

Com toda complexidade exposta por esse equipamento, surgem várias oportunidades de estudo que visam a redução de custos de operação com materiais e paradas para manutenção corretiva. O manual CEMA é uma boa ferramenta para o auxílio nas análises dos diferentes parâmetros que compõe os cálculos de uma correia transportadora e possibilita a orientação quanto a metodologias de melhorias nesses tipos de transportadores, buscando maior eficiência.

1.1 OBJETIVOS

1.1.2 Objetivos gerais

Analisar o dimensionamento de uma correia transportadora implantada em uma empresa de mineração com base no manual CEMA e estudar a influência dos diversos componentes do equipamento na demanda de potência de acionamento.

1.1.3 Objetivos específicos

- Fazer um levantamento dos principais equipamentos utilizados em uma planta de mineração típica;
- Realizar a análise do dimensionamento de uma esteira transportadora aplicada em mineradora;
- Estudar o impacto dos diversos componentes na demanda de potência
- Realizar análise da especificação do motor e demais componentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Contexto da mineração no Brasil

No Brasil, a mineração teve início no final do século XVII com o começo do quarto ciclo econômico que trouxe o garimpo do ouro. Antes desse momento, o país ainda presenciou o ciclo do Pau-Brasil, do açúcar e da pecuária pastoreio. No entanto, foram nos séculos XVII e XVIII que a Coroa Portuguesa pode desfrutar do luxo que o ouro poderia proporcionar, pois nesse período o Brasil era responsável por 50% da produção mundial. No decorrer do tempo, o país teve a economia sendo impactada por diversos setores e materiais, o que deu espaço para outros minerais, como: Manganês, quartzo, mica e minério de ferro, por exemplo (MACHADO; FIGUEIRÔA, 2022).

A evolução do garimpo deu início à atividade de mineração em larga escala, com tecnologias mais avançadas em todo o processo, desde a lavra até o beneficiamento e transporte do material. No entanto, o Brasil por muito tempo foi um país atrasado quanto às metodologias de mineração, o que o tornava menos eficiente em várias partes do processo, começando pela lavra até o sistema de logística. Com maiores investimentos juntos aos ciclos de alta das *commodities*, houve um desenvolvimento significativo na cadeia de extração de minerais, o que garantiu maior competitividade do país frente aos seus concorrentes no exterior, apesar de ainda estar defasado quando comparado aos seus pares internacionais (GERMANI, 2002).

Se os minerais estivessem espalhados uniformemente pela Terra a sua dispersão inviabilizaria a extração, tanto por motivos estratégicos quanto por econômicos, mas não é o que acontece. A disposição desses materiais no solo é regida por características geológicas da natureza durante um intervalo de tempo, que pode ser milhões de anos. Dessa forma, tem-se um material associado a rochas e concentrado em determinadas regiões que são conhecidas como reservas prováveis ou provadas, onde no segundo caso se trata de reservas com maior índice de confiabilidade e economicamente mais viáveis, mas as reservas prováveis também são passíveis de lavra a depender dos resultados da avaliação geológica (WILLS; FINCH, 2016).

Os estudos básicos geológicos e hidrológicos no Brasil são realizados pela CPRM - Serviços Geológico do Brasil/MME, enquanto a gestão dos recursos minerais são responsabilidade do Departamento Nacional de Minas e Energia/Ministério de Minas e Energia DNPM/MME e pertencem à União. Todo esse material é disponibilizado e serve de apoio para que as mineradoras deem início a prospecção das possíveis áreas de exploração (LUZ;

SAMPAIO; FRANÇA, 2010). Em seguida são realizadas amostragens do solo para verificar a constituição mineral da área delimitada (Teor dos diversos minérios, distribuição granulométrica, massa específica, constituintes mineralógicos), com essa etapa sendo crucial para o desempenho econômico da empresa mineradora. Por isso, todo o processo deve ser feito utilizando o procedimento mais adequado para a situação, assim como o desenvolvimento dos modelos geo-estatísticos e do modo de tratamento do material coletado (SAMPAIO; FRANÇA; BRAGA, 2007).

2.2 Beneficiamento de minério

Em continuação às etapas anteriores, seguem os procedimentos de desmonte, onde as rochas no solo são desfragmentadas de forma manual, por meio de equipamentos hidráulicos, mecânicos ou utilizando explosivos, esse último o mais utilizado. Porém, esse procedimento deve ser detalhadamente planejado, pois impacta na qualidade do produto final, no consumo de energia da planta de beneficiamento, na vida útil dos equipamentos e como consequência, no lucro da empresa. Esses fatores tornam essa etapa alvo de novos estudos e tecnologias a fim da busca pela maior eficiência e assertividade possível. Ao mesmo tempo, alguns estágios continuam sendo primordiais para o sucesso dessa operação, como: Preparação do ambiente, levantamento topográfico, qualidade da perfuração, desenvolvimento do plano de fogo e controle de vibrações. Além disso, as estratégias e materiais escolhidos para o processo de desmonte são cruciais para o resultado do mesmo, como por exemplo a seleção dos explosivos (LOPES; DINIZ; CONCEIÇÃO, 2021).

O desmonte pode ser realizado ou apoiado por tratores, retroescavadeiras, carregadeiras frontais e o transporte do material para a planta geralmente é feito por caminhões basculantes de até 30t ou caminhões fora de estrada com capacidade de 90t a mais de 200t. As carregadeiras ainda apoiam no processo de alimentação da planta e, em muitas ocasiões, trabalham carregando os caminhões com o produto final ou estéril, que são encaminhados para as próximas etapas de logística (SAMPAIO; LUZ; LIMA, 2001).

Todo o maquinário precisa ser estrategicamente implantado de acordo com as necessidades de atuação do mesmo. Escavadeiras hidráulicas têm vantagens quanto a facilidade de locomoção e no trabalho em terrenos menos resistentes à compressão. A escolha da retroescavadeira adequada está alinhada à abertura dos britadores primários, assim como as retroescavadeiras e pás carregadeiras podem ser escolhidas de acordo com os caminhões que

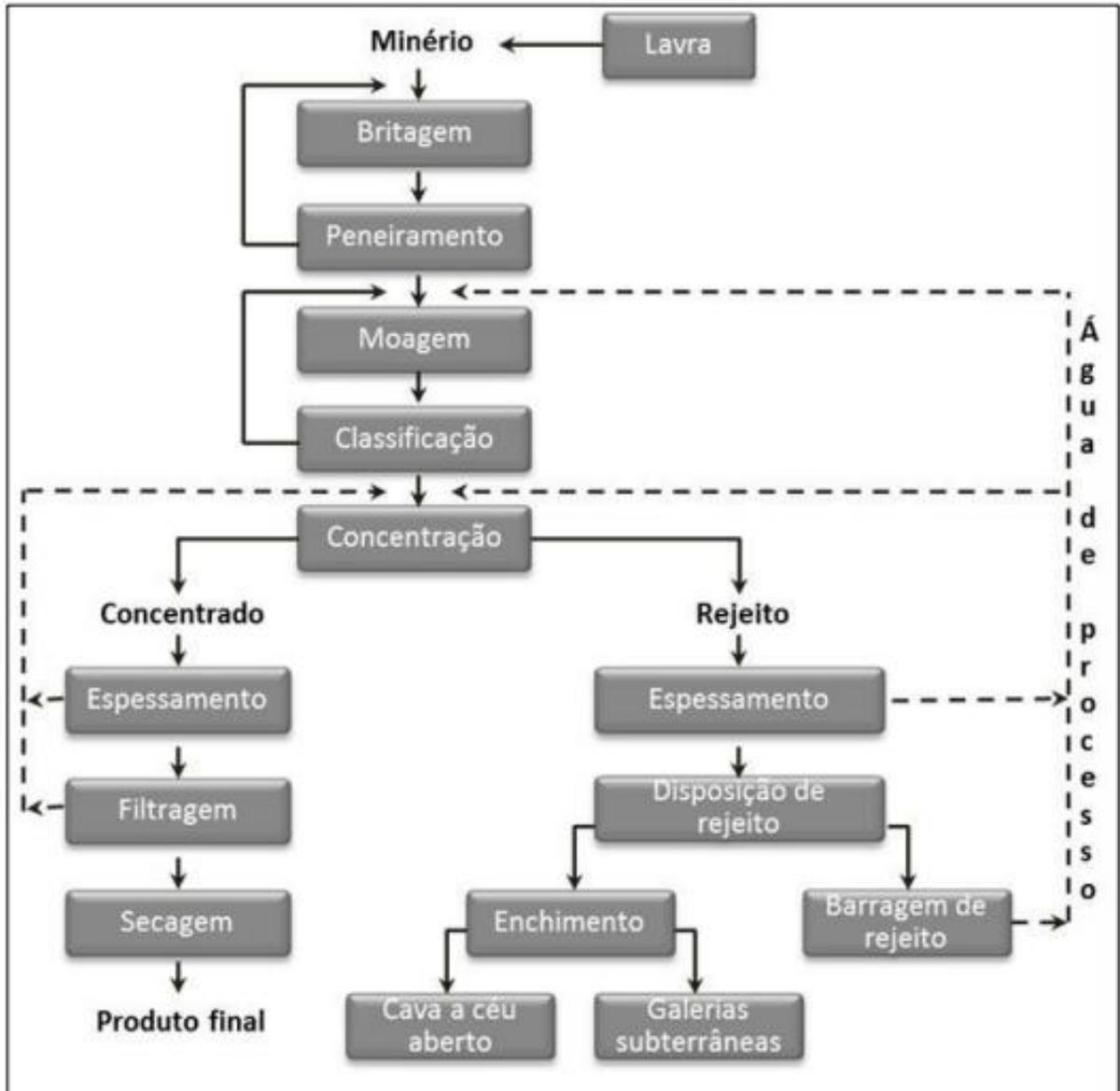
receberão o material. Essa combinação entre caminhões e carregadeiras foi se tornando mais ineficiente nas empresas a partir do momento em que a capacidade dos caminhões começou a aumentar desproporcionalmente a das carregadeiras (GERMANI, 2002).

Em geral, o beneficiamento se constitui de operações unitárias que independem, em grande parte, do material a ser tratado. O que altera de uma planta para a outra é a combinação e disposição de atividades no fluxograma. Essas variações da cadeia de tratamento mineral visam atender as especificidades de cada material trabalhado. Dessa forma, segundo Chaves (2002), todo processo se reduz a:

- Operações de cominuição: Nessa etapa ocorrem os processos de britagem e moagem onde o material é moído a ponto de se obter tamanho adequado de partículas para as próximas fases de processamento. Esse estágio é auxiliado também por peneiras e classificadores que atuam na função de separação dos tamanhos de particulado.
- Operações de concentração: Seleciona o material fazendo a separação entre substância útil e rejeito.
- Operações auxiliares: São as atividades de transporte do material entre as operações e a retirada da água proveniente do processo. Esses procedimentos são caracterizados como: Espessamento, filtração e secagem.

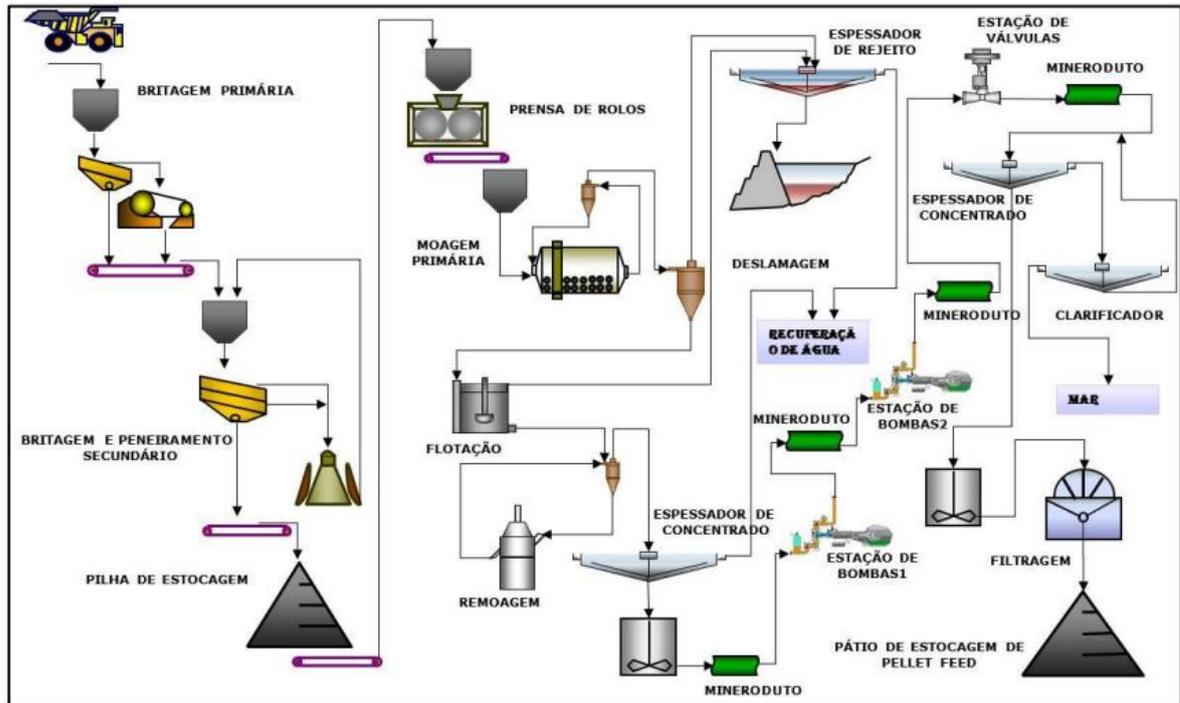
Na Figura 1 estão representados três fluxogramas que apresentam um diagrama com as principais operações unitárias do tratamento de minério, a Unidade de Manuseio e Beneficiamento de Itabiritos da Anglo American (Figura 2) e em uma mina de processamento de minério da Vale (Figura 3):

Figura 1 - Diagrama com as principais operações unitárias do tratamento de minério



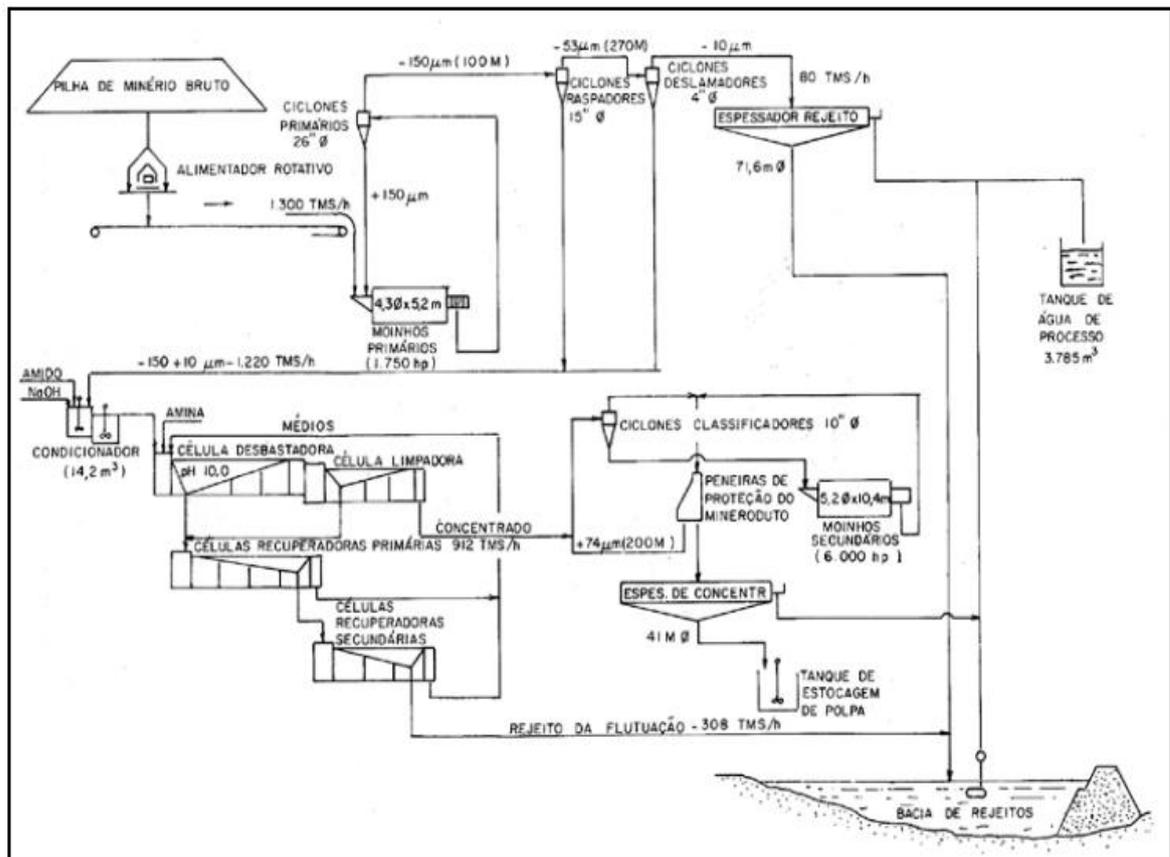
Fonte: LUZ; FRANÇA; BRAGA (2018)

Figura 2 - Fluxograma da Usina de Beneficiamento da Mina do Sapo



Fonte: FERREIRA (2018)

Figura 3 - Fluxograma de uma linha de processo de usina de concentração da Samarco



Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010)

2.2.1 Estágios e equipamentos do processo de beneficiamento

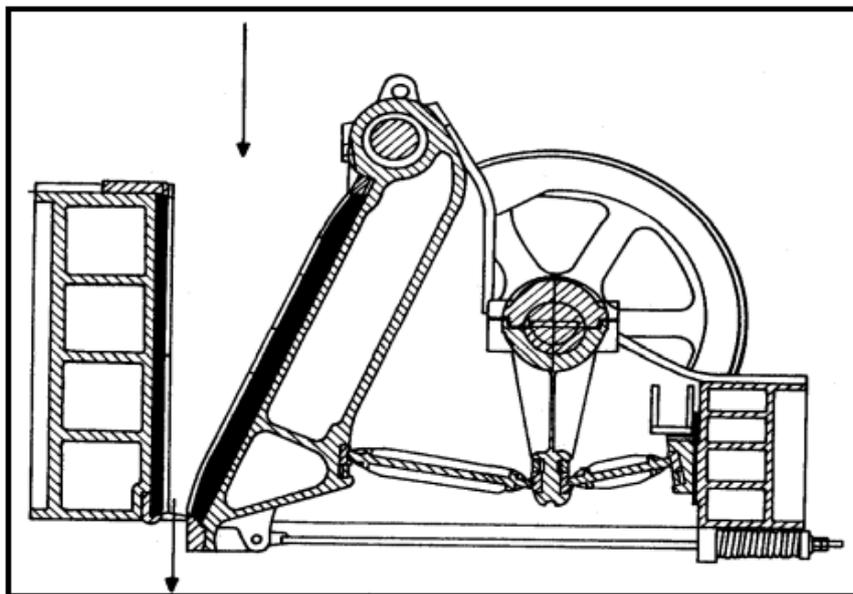
O beneficiamento de minério consiste em um conjunto de etapas que partem do planejamento e extração da matéria prima até o produto final. Fazem parte desse processo alguns equipamentos que exercem diferentes funções nas mineradoras e o dimensionamento correto dos mesmos evita gargalos e garante a eficiência das atividades (FERREIRA, 2018).

2.2.1.1 Britagem e britadores

De acordo com Luz (2022), na britagem o material chega da lavra aos britadores com tamanho adequado após o processo de desmonte. Nesse estágio ocorre a fragmentação do conteúdo de forma que o mesmo alcance dimensões apropriadas para as próximas etapas, que geralmente se caracterizam pelas técnicas de moagem.

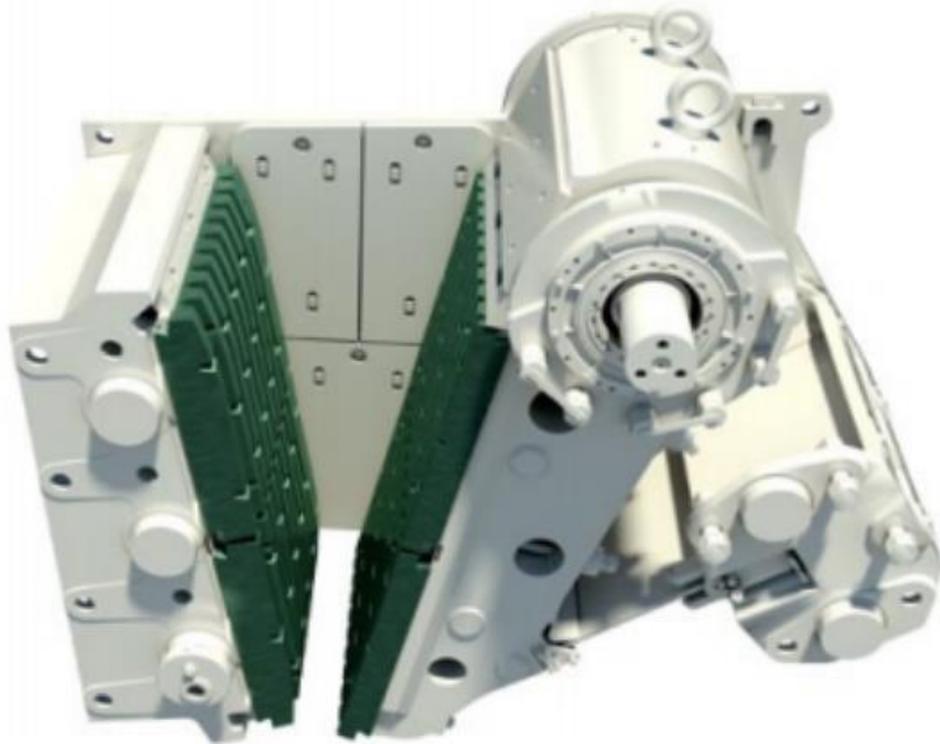
O autor ainda ressalta que os britadores de mandíbula são utilizados normalmente nos primeiros estágios, muitas vezes sendo conhecidos como britadores primários, principalmente por triturarem materiais mais grosseiros. Esses equipamentos possuem uma mandíbula fixa, presa em sua carcaça e uma mandíbula móvel que é acionada por motor. Assim, ocorrem movimentos alternados da mandíbula móvel em relação à fixa, pressionando e quebrando o material como é mostrado nas Figura 4 e Figura 5.

Figura 4 - Britador de mandíbula



Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010)

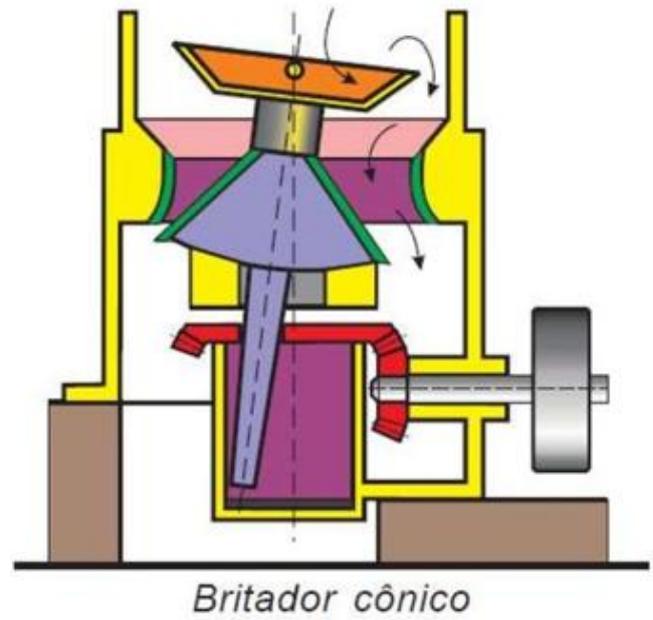
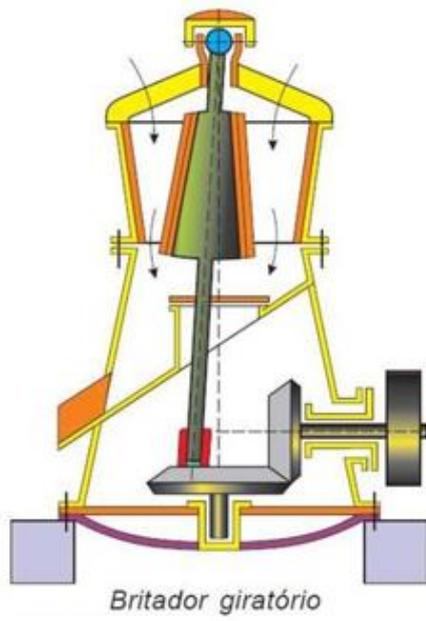
Figura 5 - Corte esquemático de um britador de mandíbulas



Fonte: SOUZA (2016)

Há também os britadores cônicos e os giratórios que, a depender do *layout* da planta de beneficiamento, podem ser britadores secundários ou terciários, recebendo o material do britador primário. Em alguns casos, os britadores giratórios mais robustos também são implantados na britagem primária. O método de cominuição desses britadores são idênticos, pois trabalham com um cone, movimentado por motores, girando de forma excêntrica no meio da carcaça, colidindo, pressionando e triturando o material (CHAVES; PERES, 2003). As duas funcionalidades podem ser vistas nas Figuras 6, 7 e 8.

Figura 6 - Britador giratório e britador cônico



Fonte: METSO (2020)

Figura 7 - Britador Cônico



Fonte: METSO (2017)

Figura 8 - Britador giratório

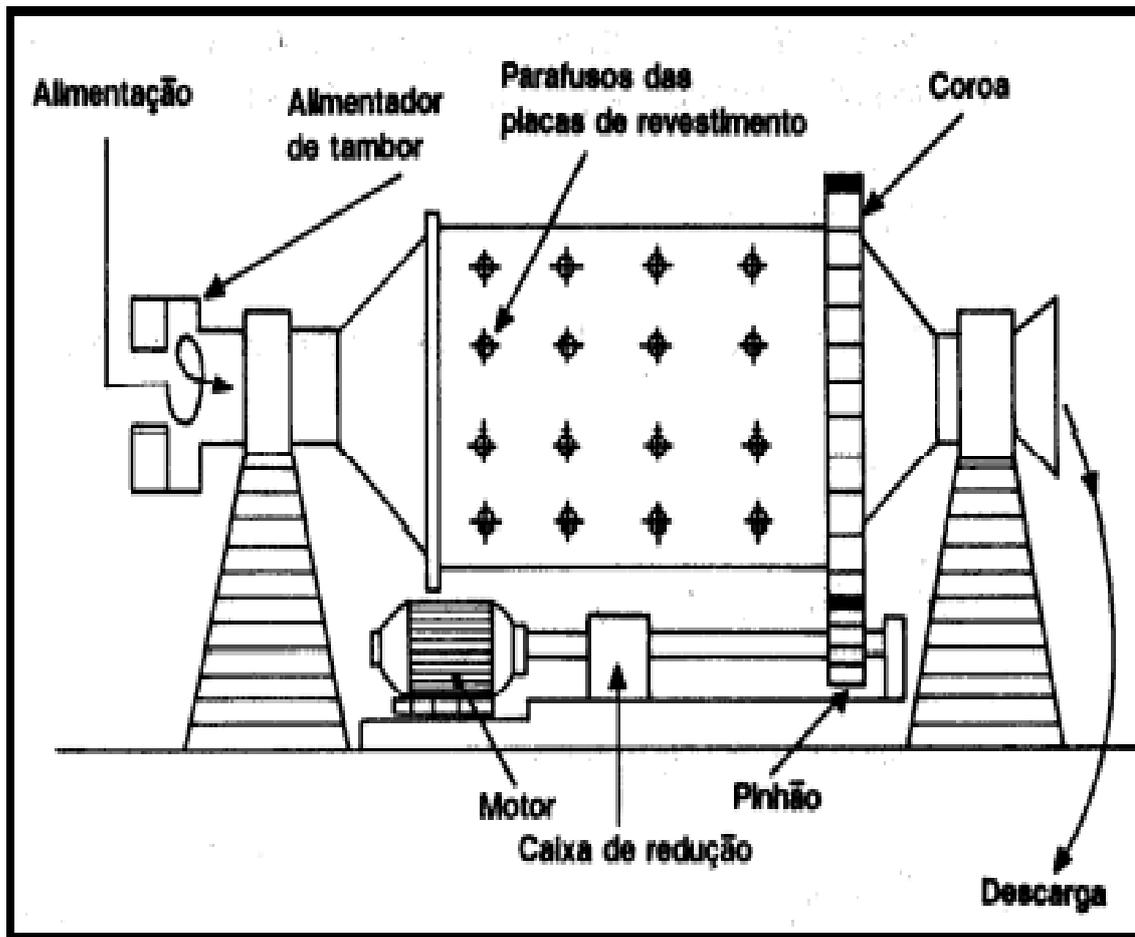


Fonte: SAVREE (2022)

2.2.1.2 Moagem

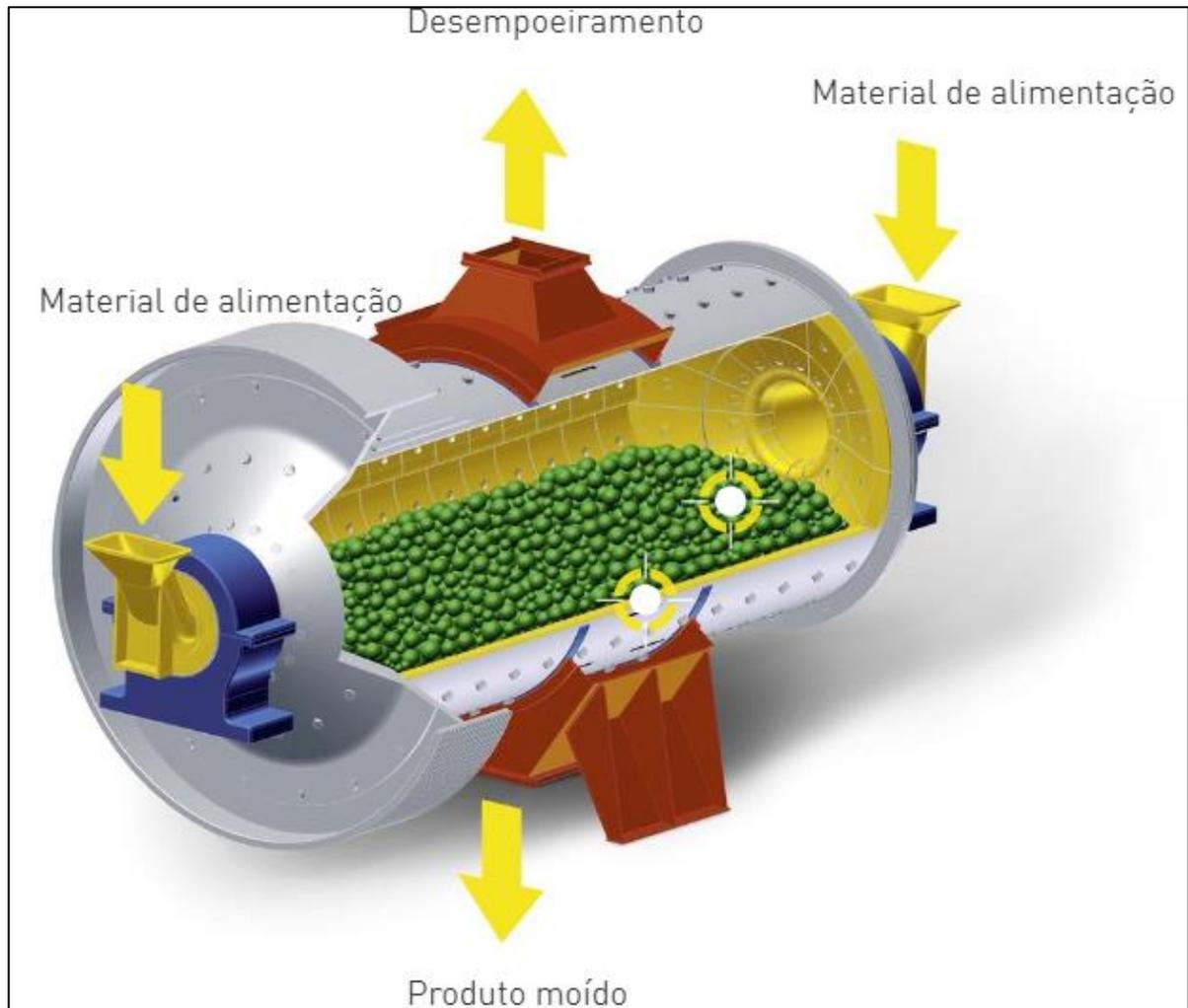
Como último estágio da fragmentação, tem-se a moagem, que combina diferentes forças (abrasão, impacto, compressão, atrito) para resultar no tamanho adequado do material para os próximos estágios que normalmente são etapas de concentração. Os moinhos cilíndricos são cilindros de ferro que podem ser revestidos internamente com borracha ou placas de aço. Enquanto esse cilindro gira sobre mancais, carga de barras, esferas de aço ou de ferro, que ficam soltas em seu interior, executam o trabalho de moer o material e prepará-lo para as etapas subsequentes (Figuras 9 e 10) (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA; 2010).

Figura 9 - Moinho cilíndrico



Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010)

Figura 10 - Moinho cilíndrico



Fonte: PFEIFFER (2022)

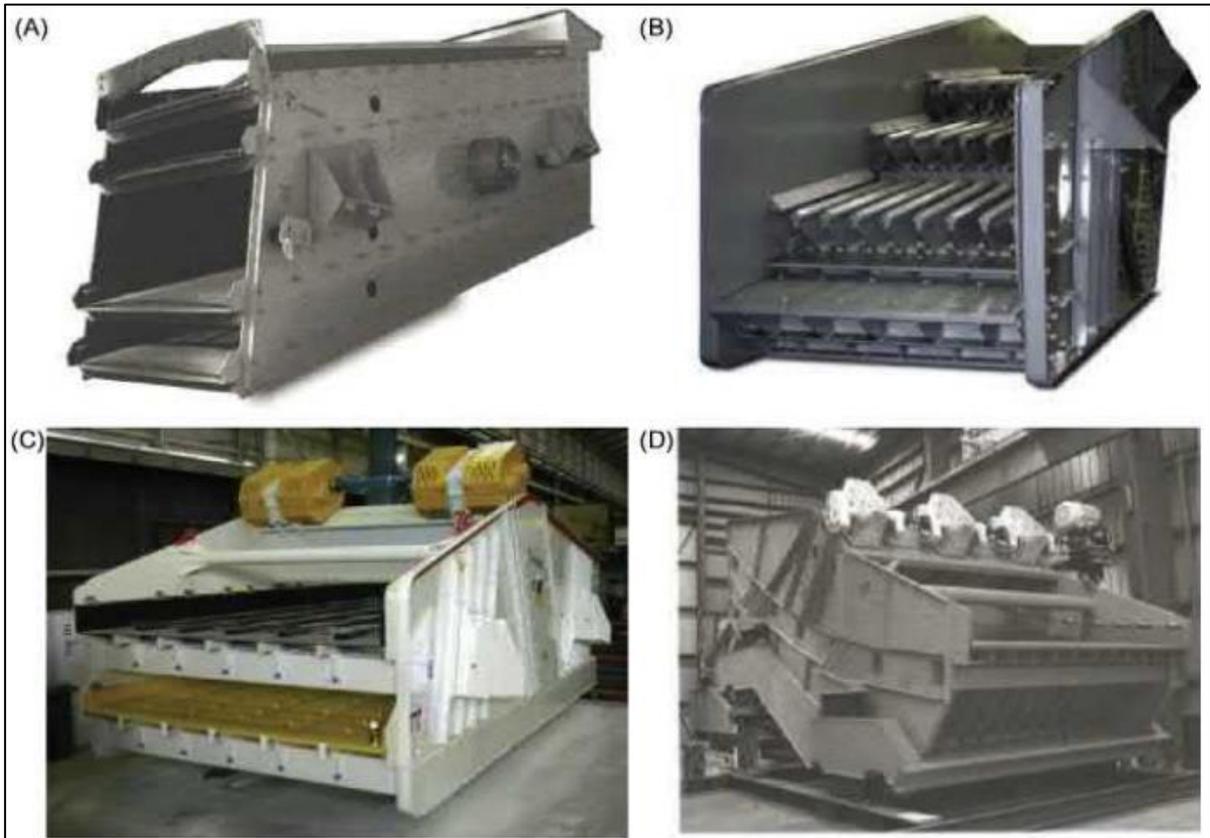
2.2.1.3 Peneiramento

O peneiramento consiste na separação de materiais em dois tamanhos diferentes, onde a matéria que passa pelo gabarito da peneira é conhecida como "*Undersize*" e o que fica retido é o "*Oversize*". Os equipamentos a serem escolhidos para essa função variam de acordo com a necessidade de seleção das partículas, que pode variar de 130 μm a 18" (CHAVES; PERES, 2003).

Chaves e Peres (2003) ainda ressaltam que a função de peneiramento pode ser exercida por peneiras vibratórias inclinadas, peneiras vibratórias horizontais, peneiras fixas, grelhas e peneiras rotativas. O equipamento mais comum nas mineradoras é a peneira vibratória horizontal ou inclinada, que possuem estrutura de aço apoiada em molas com *decks* que

sustentam as telas responsáveis pela separação do material. Abaixo podem ser vistos quatro tipos de peneiras vibratórias por meio da Figura 11.

Figura 11 - Diferentes modelos de peneiras



Fonte: LUZ (2022)

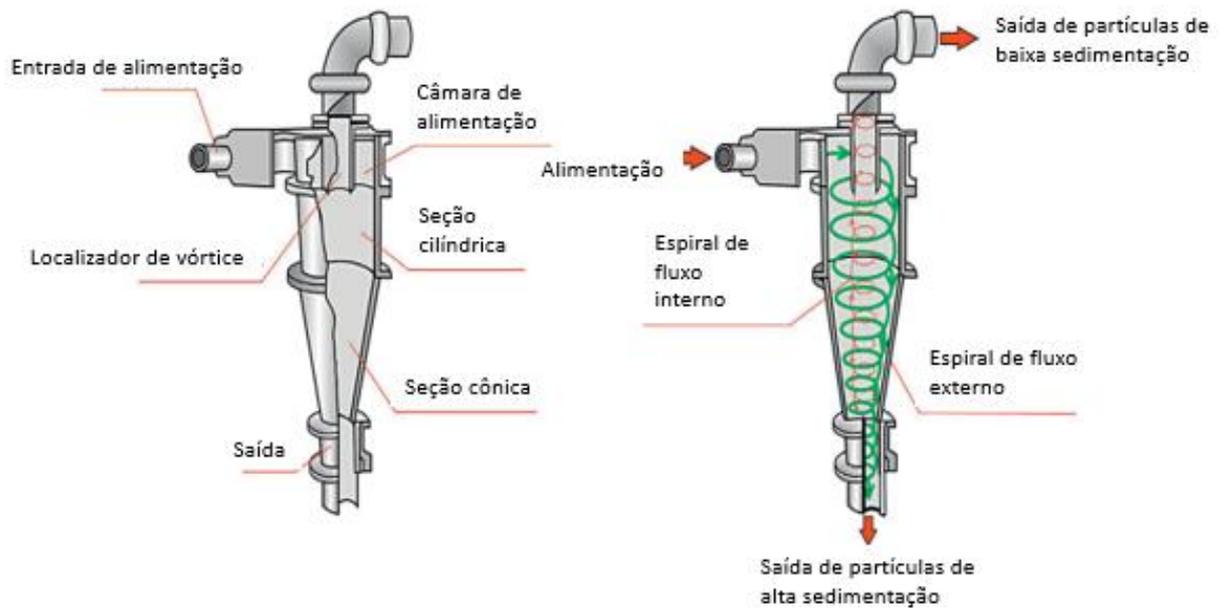
2.2.1.4 Classificação

Os classificadores têm o papel de filtrar as partículas que passam pelo processo. Dessa forma, eles impedem que materiais com tamanho inadequado continuem pelo sistema e os faz voltar para as etapas de cominuição. Entretanto, algumas informações são importantes para o projeto de um mecanismo como esse, tais como: tamanho das partículas, porosidade, densidade média e composição mineral do material, dentre outros fatores. Os principais equipamentos de classificação são: Hidrociclones e espirais (DONSKOI; SUTHERS; RAYNLYN, 2008).

Os hidrociclones executam a ação de classificação por meio da força centrífuga, onde o material é alimentado pela parte superior do equipamento, com a força centrífuga separando as partículas de acordo com suas características físicas. Dessa forma, o material com sedimentação

mais rápida se desloca para as paredes do hidrociclone e saem pelo *underflow*, enquanto as partículas de sedimentação mais lenta entram em uma zona de baixa pressão, no centro do eixo, deslocando-se para cima (*Overflow*), como é mostrado nas Figuras 12 e 14, enquanto a Figura 13 apresenta um conjunto de hidrociclones (WILLS; FINCH, 2016).

Figura 12 - Modelo de funcionamento de um hidrociclone



Fonte: WILLS; FINCH (2016)

Figura 13 - Conjunto de hidrociclones



Fonte: WEIR (2016)

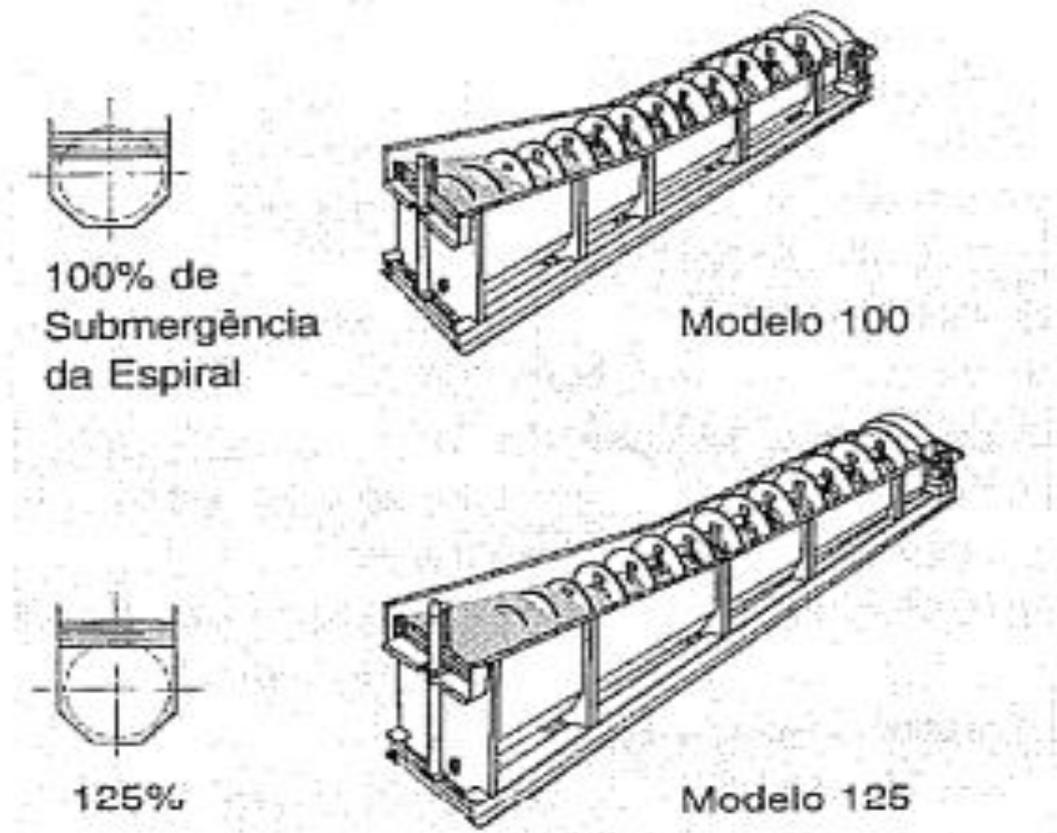
Figura 14 - Perfil em corte de um hidrociclone



Fonte: BRAVIM; PEREIRA (2007)

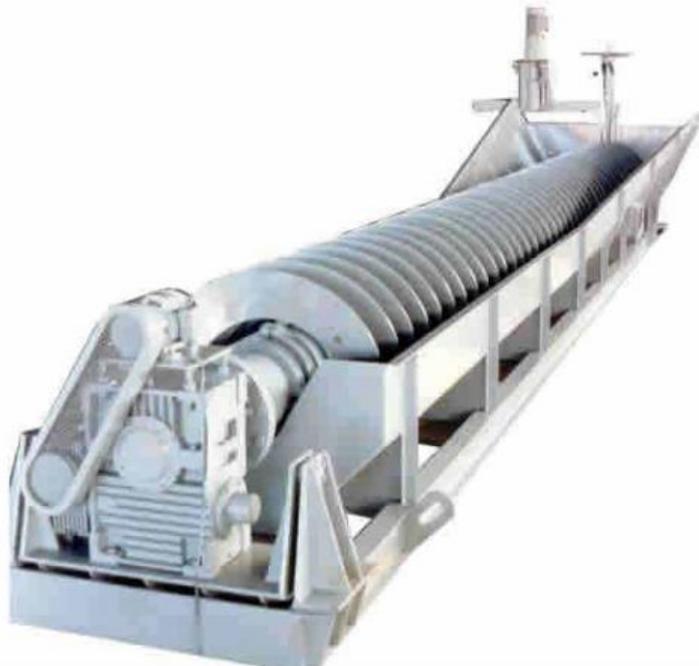
Os classificadores por espirais trabalham suspendendo o rejeito presente em um reservatório enquanto o material útil sai por cima do vertedouro (*Overflow*), separando as partículas do rejeito (Figuras 15 e 16) (WILLS; FINCH, 2019). Outros modelos deste equipamento são espirais alimentadas por gravidade onde o material entra na parte superior das espirais. Dessa forma, tem-se um grande de velocidade pela superfície das espirais, onde o concentrado sai por um tubo no centro do equipamento e o rejeito é escoado pela superfície do mesmo (Figura 17) (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Figura 15 - Classificador de espiral (Adaptado)



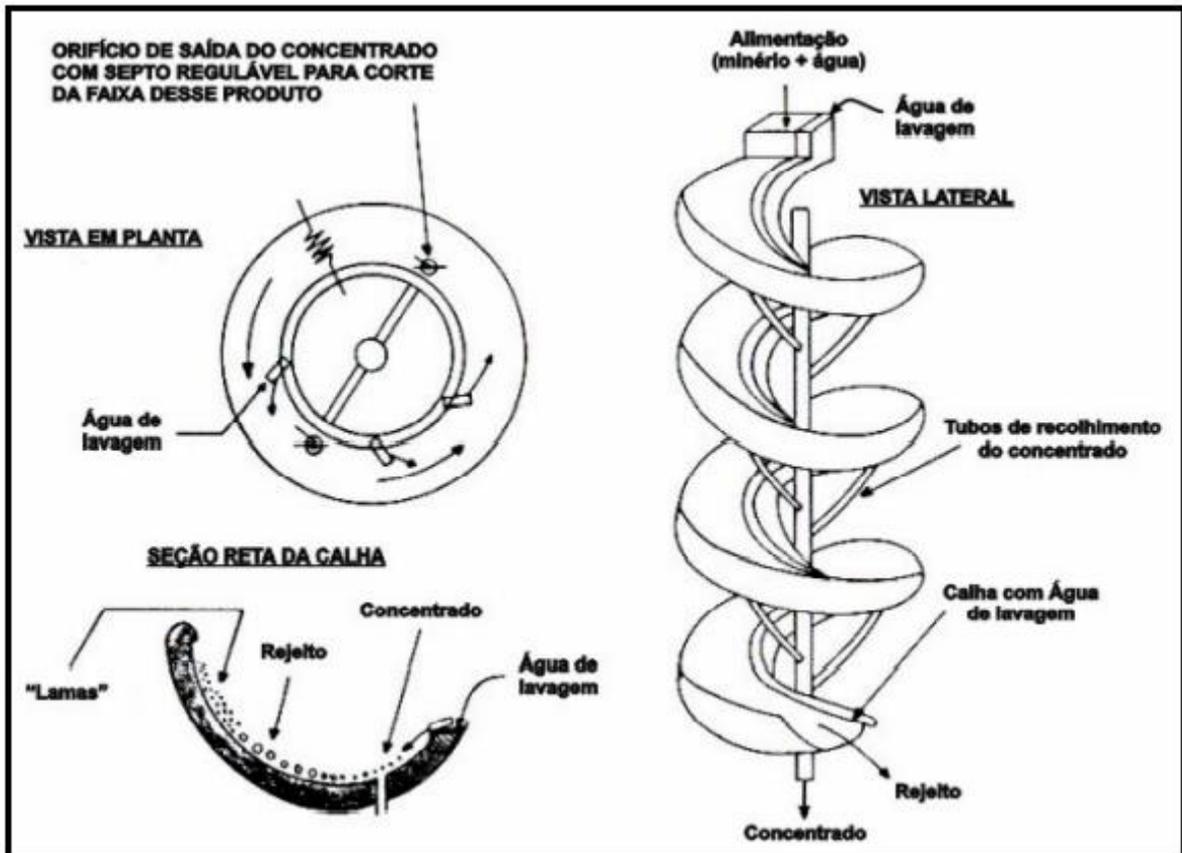
Fonte: CHAVES (2002)

Figura 16 - Classificador espiral



Fonte: ENGENDRAR (2022)

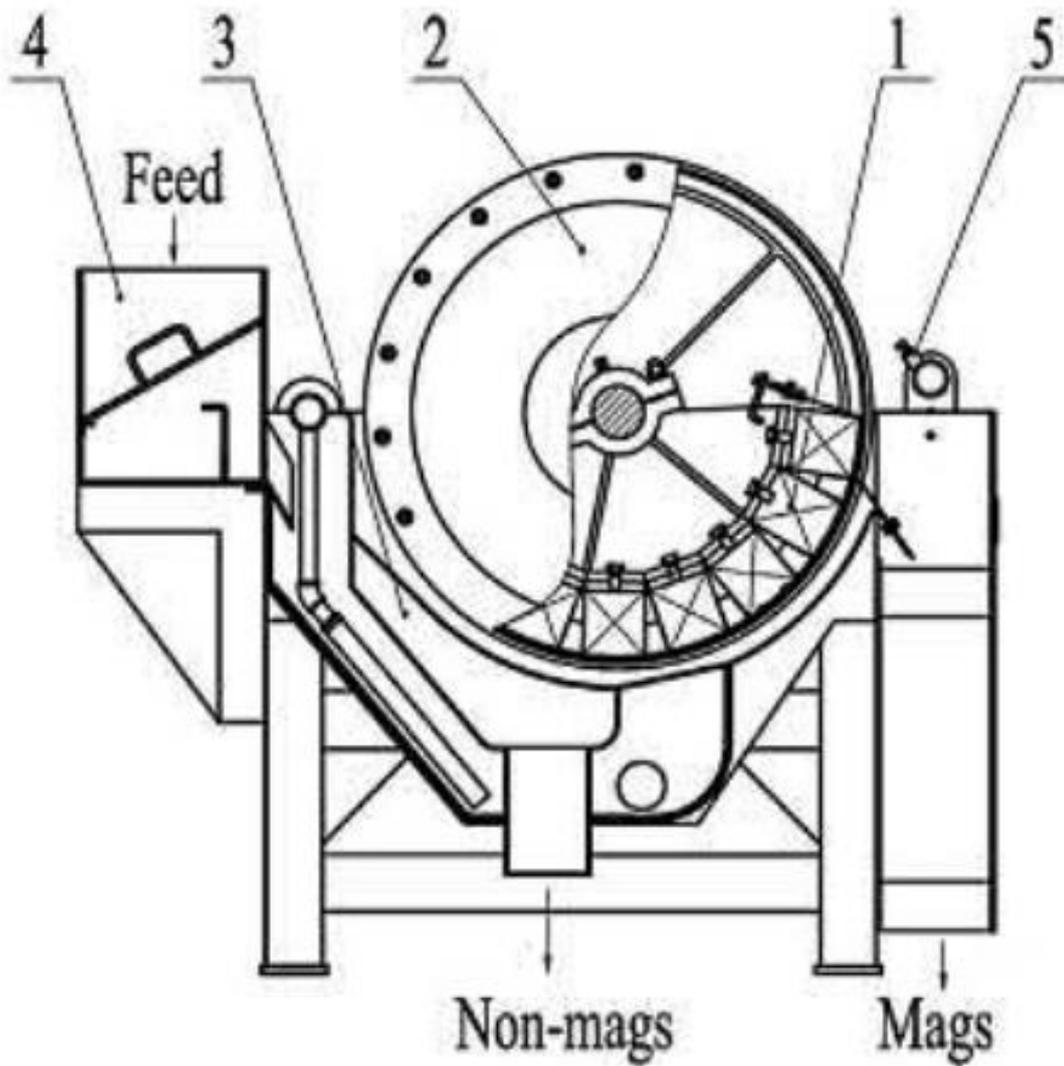
Figura 17 - Classificador de espirais (Por gravidade)



Fonte: LUZ; SAMPAIO; FRANÇA (2010)

Os separadores magnéticos são equipamentos responsáveis por separar o material fino. Os separadores são alimentados e por meio de forças magnéticas, puxa as partículas de minério para sua superfície e o rejeito passa pelo aparelho arrastado pela gravidade e fluxo de água (LU, 2022). Suas partes são especificadas nas figuras 18 e 19.

Figura 18 - Estrutura de um separador magnético (1: Sistema magnético permanente 2: Tambor giratório, 3: Calha de separação, 4: Tanque de alimentação, 5: Tubulação de descarga)



Fonte: LU (2022)

Figura 19 - Modelo de separador magnético



Fonte: METSO (2022)

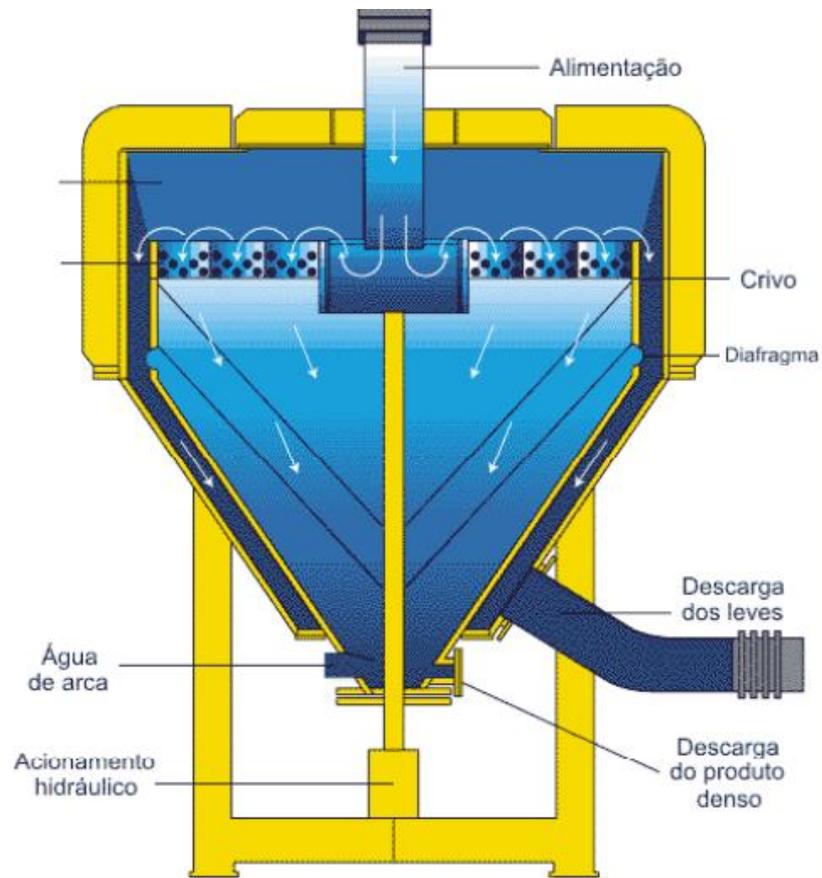
Na jigagem é formada uma camada de material e água no crivo do jig (Tela/Leito), onde ocorre a estratificação das partículas por meio da densidade. O que é pesado passa pela tela, indo para o *underflow* e o material mais leve saem por canais (*Overflow*) para os próximos estágios. No leito são colocados materiais, como esferas de aço, que servirão como filtro, permitindo ou não a passagem por seus interstícios. Com isso, surge a alternativa de controlar os furos do crivo para que as partículas menores e pesadas passem pelos canais sendo separadas do material maior e mais leve (WILLS; FINCH, 2016). Na Figura 20 pode ser visto um desenho modelo do jig enquanto a Figura 21 detalha o esquema de funcionamento do mesmo.

Figura 20 - Jigue



Fonte: SOUZA (2013)

Figura 21 - Esquema de trabalho de um jigue

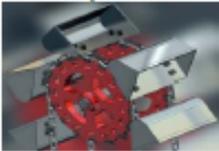


Fonte: CASADO; CARRASCO (2013)

2.2.1.5 Mecanismos de transportes de sólidos

Entre as operações presentes nas empresas podem ser vistos vários mecanismos que transportam os produtos de uma atividade para a subsequente. Para essas funções existem várias opções que atendem as diferentes necessidades das operações e indústrias, possibilitando a escolha mais adequada para as mais específicas situações, como pode ser visto na Tabela 1:

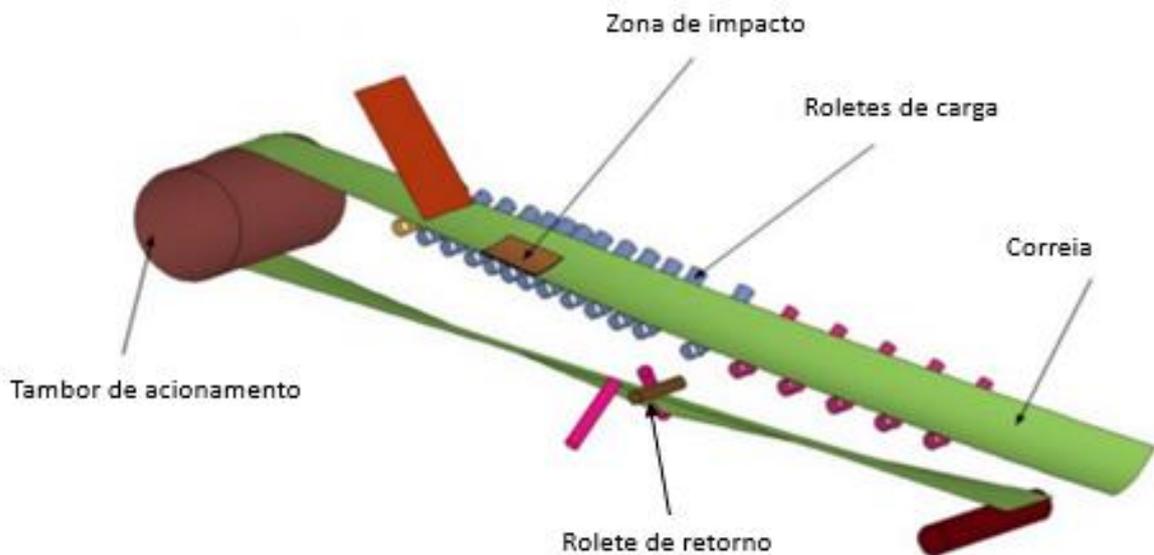
Tabela 1 - Transportadores

EQUIPAMENTO	DESCRIÇÃO	VANTAGENS	DESvantagens
<p>CORREIA</p> 	Usualmente de borracha, instalada sobre roletes e entre tambores de acionamento e retorno.	Rápida construção; instalação simplificada; continuidade na movimentação; transporte de diferentes materiais e grandes quantidades.	Perda de material; exposição às intempéries.
<p>ESTEIRA</p> 	Versátil, pode ser plana ou inclinada, lisa ou vazada, com ou sem uso de taliscas.	Permite a movimentação de diversos materiais.	Perda de material; exposição às intempéries.
<p>CORRENTE</p> 	Utilizada em cargas maiores ou quando a geometria da peça exige este tipo específico de estrutura.	Desloca itens pesados ou leves; possui facilidade de fazer curvas.	Em sistemas robustos há alto consumo de potência; contínua manutenção preventiva.
<p>CANECA OU CAÇAMBA</p> 	Usado em granéis sólidos e em elevação. As caçambas presas em correntes descarregam quando giram na parte superior. Constituídos de uma ou duas colunas.	Efetua transporte vertical ou inclinado até 70°; Caneca confinada, minimiza a dispersão de particulados.	Baixa velocidade e difícil manutenção em função do peso do sistema e da altura.
<p>HELICOIDAL</p> 	Rosca sem fim, cuja helicóide atua em um canal semicircular.	Pode atuar em diferentes funções como mistura, lavagem, secagem.	Utilizado apenas em pequenas distâncias; desgaste da rosca transportadora por atrito.
<p>TRANSPORTADOR HIDRÁULICO</p> 	Empregado para sólidos particulados com água, como nos minerodutos.	Sem perda para o meio ambiente; trabalha com longas distâncias e inclinações.	O sólido fica em contato com a água; há elevado consumo de potência para bombeamento.
<p>TRANSPORTADOR PNEUMÁTICO</p> 	Sólidos particulados são transportados por ar ou outros gases inertes. São classificados em fase densa e em fase diluída.	Sem perda de material; com facilidade de atuação em grandes distâncias e alta velocidade.	Atrito com as paredes; variação de parâmetros de projeto em função do material transportado.

As correias transportadoras são frequentemente utilizadas em uma larga gama de indústrias, desde o setor de construção civil até em portos marítimos. Isso, devido às vantagens que esse sistema apresenta (MOLNÁR et al., 2014). Por terem uma finalidade simples, flexibilidade quanto à disposição e eficácia no transporte de material solto, esse equipamento se torna uma peça estratégica no modelo de produção de uma empresa (HONUS et al., 2017).

Esse mecanismo funciona transportando materiais por cima da correia de transporte, também conhecida como “Tapete”, sendo acionado por meio de conjuntos moto-redutores. Outros componentes importantes são os roletes que auxiliam no transporte do produto e os tubos tensionadores. Alguns equipamentos podem ser acompanhados de mesa de impacto e com dispositivos auxiliares como raspadores (HONUS et al., 2017). Os principais componentes são descritos na Figura 22 e apresentados na Figura 23.

Figura 22 - Componentes de uma correia transportadora



Fonte: HONUS et al. (2017)

Figura 23 - Correias transportadoras



Fonte: ANDRADE; FARIA (2004)

Além de ser um método econômico no transporte de materiais, as correias transportadoras são equipamentos críticos para várias empresas, o que pode ser observado principalmente nas empresas de mineração. Por isso, a importância de metodologias para identificação, controle e prevenção de falhas (WEBB et al., 2020). O funcionamento adequado desse equipamento necessita de indicadores precisos que possibilitam identificar fatores que podem levar o mecanismo a falhar, impedindo assim a suspensão das atividades que dependem do mesmo (MOLNÁR et al., 2014).

Nos projetos de correias transportadoras, alguns fatores precisam ser considerados para garantir um desempenho satisfatório do equipamento. Abaixo estão alguns elementos relevantes no desenvolvimento de projetos desse tipo segundo Blazej e Jurdziak (2020):

- Características físicas e geométricas do material transportado;
- Condições de operação dos pontos de alimentação e transferência;
- Aspectos físicos e geométricos da correia;
- Propriedades da borracha da correia;

- Propriedades de operação do transportador e dos equipamentos que o compõe;
- Condições de operação do processo;
- Qualidade e condições de manutenção e serviços realizados no equipamento.

Nesses projetos são utilizados, em sua maioria, dois métodos: O manual CEMA ou o Método Prático. O segundo método é mais simples, mais eficiente em transportadores de menor complexidade e de pequeno porte e se inicia definindo (calculando) a potência demandada para posteriormente encontrar as tensões do sistema. CEMA se inicia com os cálculos de velocidades e tensões para, no fim, calcular a potência do sistema. Além de ser assertivo, é indicado para mecanismos mais complexos (SWIDERMAN, 2007)

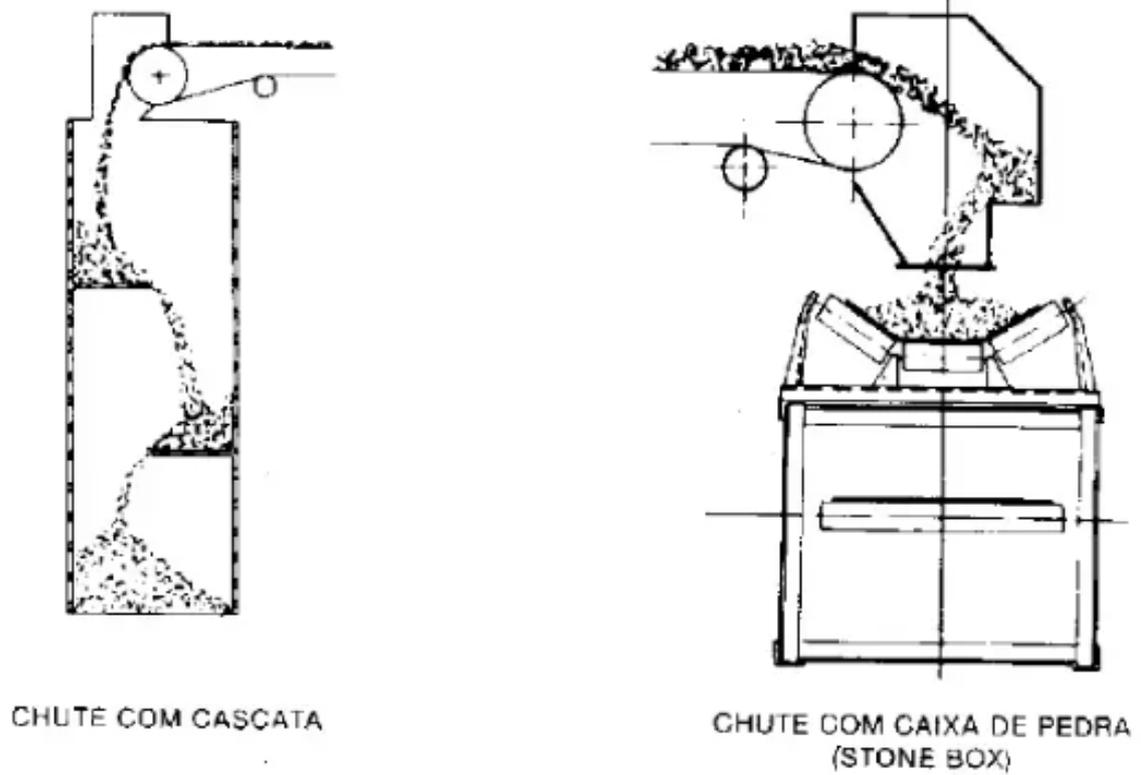
Miriam (2016) ainda cita fatores como segurança, custos de investimento de capital, confiabilidade, riscos ambientais e possibilidades de automação do mecanismo como fatores importantes no desenvolvimento do mesmo, devido à importância que as correias transportadoras têm no resultado financeiro da empresa.

Os principais componentes das correias transportadoras são descritos abaixo:

2.2.1.6 Alimentador

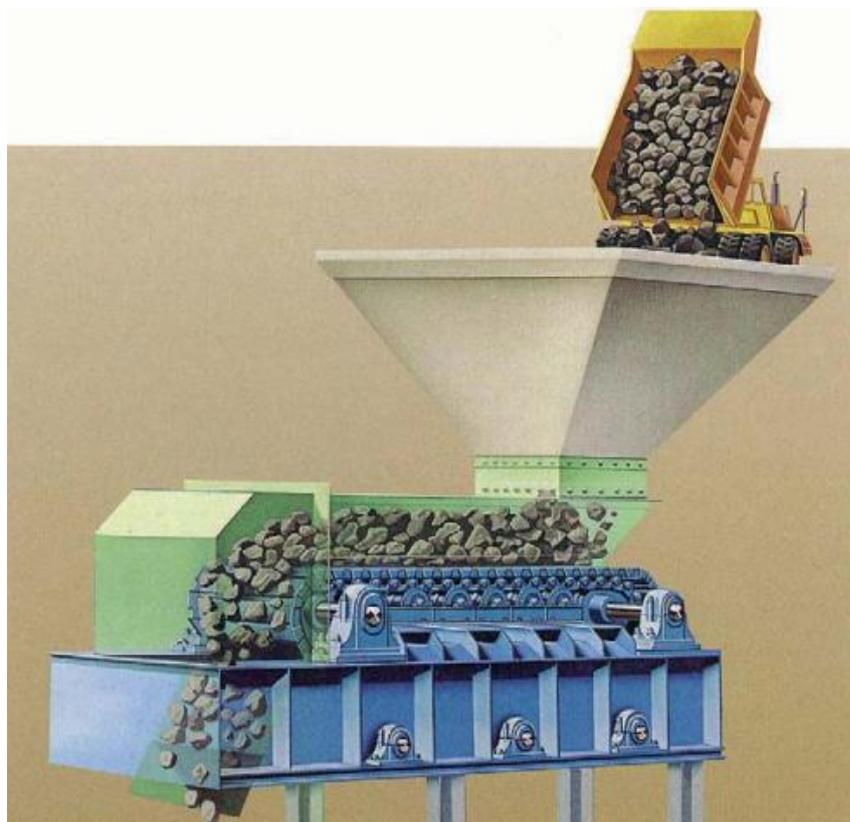
Os materiais que saem de uma determinada operação são geralmente alimentados no processo seguinte por meio de um dispositivo alimentador. Esse equipamento é dimensionado a fim de atender as especificidades do material e, por isso, é possível encontrar grande variedade de alimentadores no mercado (GOMIDE, 1983) que também são conhecidos por chutes, como pode ser visto em Faço (1981) por meio da Figura 24 e são exemplificados por meio das Figuras 25 e 26:

Figura 24 - Modelos de alimentadores de cascata



Fonte: FAÇO (1981)

Figura 25 - Alimentador primário



Fonte: METSO (2015)

Figura 26 - Alimentadores vibratórios



Fonte: METAMEC (2014)

2.2.1.7 Sistema de acionamento

O sistema de acionamento é responsável pela transferência de torque e potência para o transportador, possibilitando que o mesmo possa operar de forma adequada. Esse sistema pode ser simples, composto por um moto-reductor montado diretamente no eixo do tambor ou pode ser mais complexo, onde se faz necessário o uso de acoplamentos de baixa rotação, motor, reductor, freio, acoplamento de alta rotação, como é verificado na Figura 27 (GELAIS, 2016):

Figura 27 - Sistema de acionamento composto por um motor, acoplamento hidrodinâmico e reductor, montado em sua base



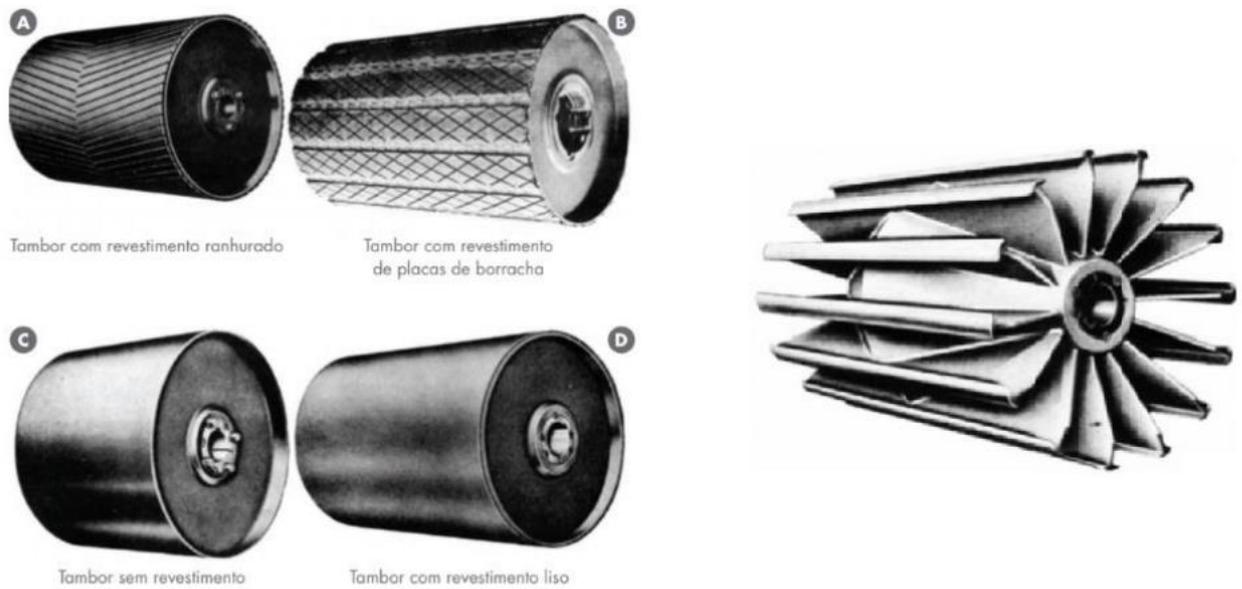
Fonte: GELAIS (2016)

2.2.1.8 Tambores

Os tambores são os elementos que conduzem o movimento entre o motor e a correia e podem ser revestidos ou não com o intuito de modificar o coeficiente de atrito entre os componentes, evitando deslizamento da correia ou alta tensão de contato e até mesmo aumentando a vida útil tanto da correia quanto dos tambores. Os revestimentos podem ser borracha natural, SBR (Borracha de butadieno estireno) e Neoprene. Eles também podem ser lisos, ranhurados ou cerâmicos. Os tambores ainda podem ser classificados quanto a função no transportador (FERRAZ, 2019) e podem ser vistos na Figuras 28 e 29:

- Tambor de acionamento: São os responsáveis por transferir o torque do motor diretamente a correia e podem estar localizados no terminal de alimentação ou descarga a depender das características do transportador.
- Tambor de retorno: Em alguns casos é responsável pelo tensionamento da correia, mas sua função principal é alterar a direção e sentido da correia de forma que ela volte a sua posição inicial, fechando um ciclo.
- Tambor de desvio: Garante a mudança de direção da correia, sendo localizados nos sistemas de tensionamento automáticos.
- Tambor de tensionamento: Localizados nos sistemas tensionadores, tem a função de tensionar a correia.
- Tambor de encosto: Aumenta a área de contato entre a correia e o tambor motriz, atuando em problemas de deslizamento.
- Tambor aletado: Possui aletas por sua superfície de contato com a correia, evitando que o material que cai entre o tambor e a correia seja pressionado entre os dois.
- Tambor magnético: Retiram os materiais magnéticos da correia transportadora, limpando o material que será alimentado nos próximos processos.

Figura 28 - Tipos de tambores (lisos e revestidos à esquerda, aletado à direita)



Fonte: FERRAZ (2019)

Figura 29 - Tambor de acionamento



Fonte: ANDRADE; FARIA (2004)

2.2.1.9 Correia

A correia é um dos principais componentes de um transportador, com seu valor impactando de 30% a 40% nos custos do mesmo. Além de ser formada por carcaça e revestimento, a correia pode ser resultado de diferentes combinações de materiais para atender larga escala de características de operação. O revestimento ou cobertura tem o papel de proteger a correia, enquanto a carcaça recebe e precisa resistir às cargas, tensões e flexões a que é submetida em condições de trabalho (REIS, 2019). As Figuras 30 e 31 ilustram o que foi citado acima:

Figura 30 - Correia sendo alocada no transportador



Fonte: Do autor (2023)

Figura 31 - Componentes básicos de uma correia transportadora



Fonte: FERRAZ (2019)

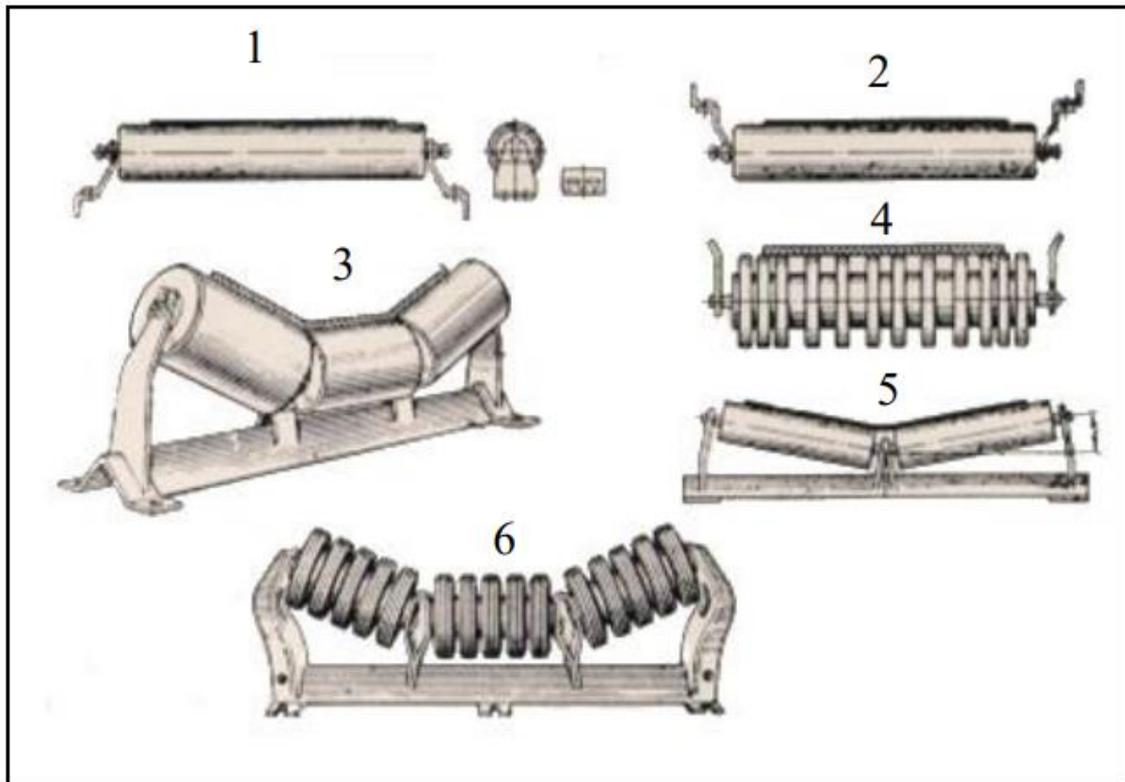
2.2.1.10 Roletes

O rolete é um rolo com capacidade de girar em torno de seu próprio eixo e que possui o papel de suportar e guiar a correia (FAÇO, 1981). Podem ser lisos ou revestidos por borracha para melhor absorção de impactos. Normalmente são constituídos por tubos de aço fixados a um eixo por meio de mancais de rolamentos e vedação apropriada. Nas Figuras 32, 33, 34 e 35 é explicado um pouco mais sobre as características dos rolos (FAÇO, 1981):

- Roletes de carga: São os roletes onde o trecho carregado da correia é apoiado.
- Roletes de retorno: São os roletes onde o trecho descarregado da correia é apoiado.
- Roletes de impacto: Roletes que absorvem o impacto na região de carregamento da correia.
- Roletes auto-alinhadores: São responsáveis por manter a correia alinhada horizontalmente em sua trajetória.
- Roletes de transição: Auxiliam na transição da correia com o tambor, guiando e sustentando essa transição.
- Roletes de retorno com anéis: Possuem a superfície emborrachada em forma de anéis para desprender o material aderido à correia e garantir que não acumule material na própria superfície do rolete.
- Roletes de espirais: Como no caso anterior, esses roletes têm forma de espiral para garantir o desprendimento do material da correia.

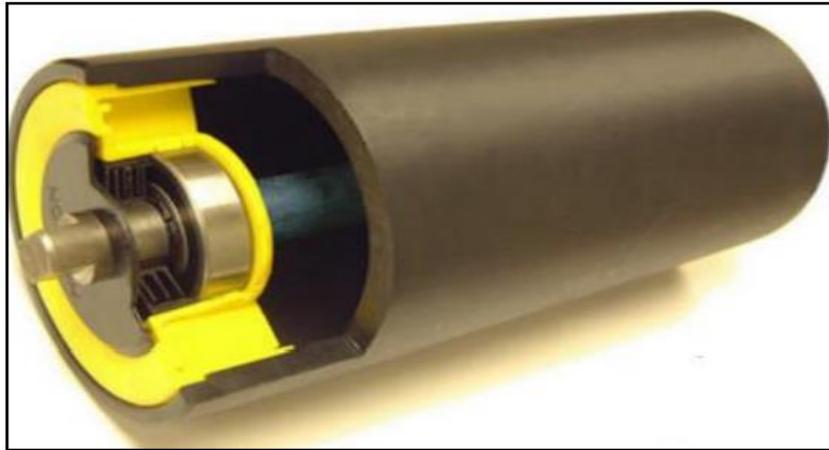
- Roletes em catenária: São interligados e suspensos no transportador.

Figura 32 - Roletes diversos: 1 – Rolete de retorno plano com rolo metálico (apoiado); 2 – Rolete de retorno plano com rolo metálico (Suspensão); 3 – Rolete de carga triplo ou retorno triplo; 4 – Rolete de retorno plano com anéis de borracha (Suspensão); 5 – Rolete liso de retorno em V; 6 – Rolete de impacto emborrachado;



Fonte: GELAIS (2016)

Figura 33 - Vista interna do rolete



Fonte: GELAIS (2016)

Figura 34 - Roletes diversos

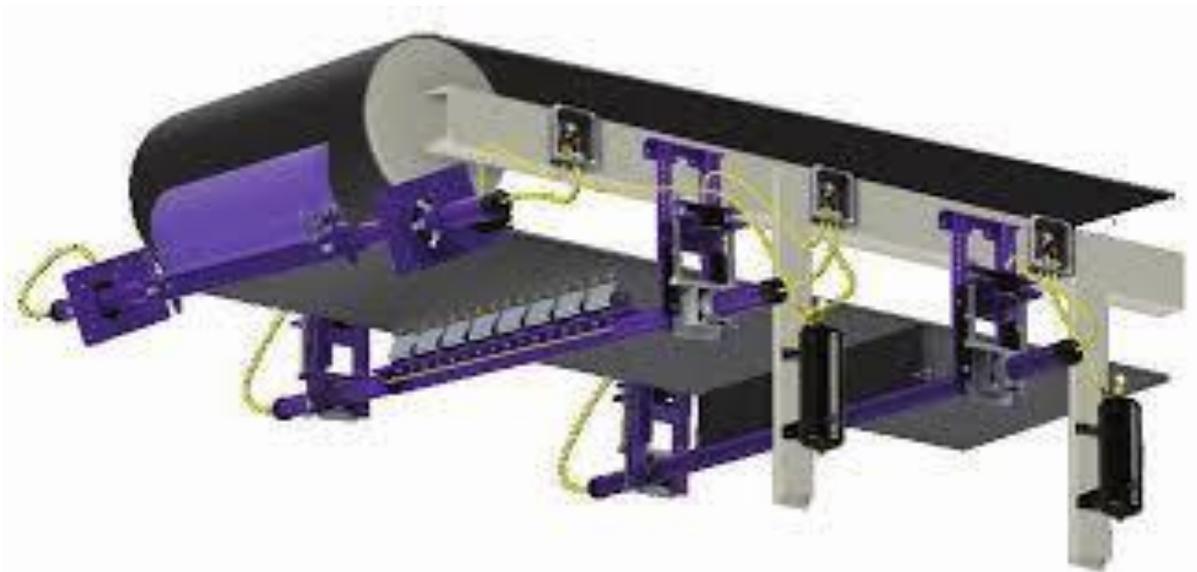


Fonte: Do autor (2023)

2.2.1.11 Acessórios de limpeza

A limpeza da correia é um fator importante para garantir a vida útil satisfatória dos componentes da correia transportadora. Dessa forma, os limpadores e raspadores apresentam papel importante para a operação do transportador. Enquanto os raspadores limpam o lado carregado da correia, os limpadores são responsáveis por limpar o lado da correia que não entra em contato com o material impedindo que o material agarrado na correia danifique os tambores de esticamento ou retorno (CARNIZELLO, 2011). Os dispositivos citados estão representados nas Figuras (35, 36 e 37):

Figura 35 - Raspadores de correia transportadora



Fonte: FLEXCO (2020)

Figura 36 - Raspador de correia



Fonte: CARNIZELLO (2011)

Figura 37- Limpadores de correia em V e diagonal



Fonte: CARNIZELLO (2011)

2.2.2 Processos e equipamentos auxiliares

Alguns processos e equipamentos são importantes, mas são caracterizados como secundários devido às funções que exercem no processo. No entanto, isso não diminui a importância dos mesmos que em muitas situações são indispensáveis para uma planta de beneficiamento de minério.

2.2.2.1 Mineroduto

São dutos responsáveis por transporte de polpa a curtas, médias ou longas distâncias. São vantajosos devido a parâmetros como confiabilidade, impacto ambiental e flexibilidade quanto a área de transposição. No entanto, exigem investimento inicial de grande porte e demonstram inflexibilidade quanto à alteração de origem e destino do transporte (CHAVES, 2002).

2.2.2.2 Bombeamento de material

Chaves (2002) diz que o bombeamento de água ou polpa pode ser realizado por diferentes tipos de bombas, onde cada uma tem um modo de atuação diferente e podem ser: Pneumáticas, centrífugas, de deslocamento positivo, de engrenagens, com sub variações em relação às características de funcionamento. Nas plantas de beneficiamento, precisam ser bem implementadas, pois o planejamento inadequado das mesmas pode resultar em manutenções corretivas, o que se traduz em custos indesejados para a empresa.

2.2.2.3 Tubulações e acessórios

Chaves (2002) ainda cita que as tubulações são responsáveis por fazer a ligação entre os equipamentos, possibilitando o transporte de materiais. Podem conter válvulas que controlam o fluxo de água e polpa. Normalmente são encontradas de ferro fundido ou aço, com acoplamento rápido ou flangeadas. A inspeção nesses equipamentos é muito importante, porque o material a que ficam expostas em uma mineradora são altamente corrosivos, ocasionando em perfurações e vazamentos nas paredes dos tubos.

2.2.2.4 Espessamento

O espessamento ocorre com a separação de sólido e líquido por meio da diferença de densidade dos materiais. Na mineração, tem o papel de: Controle da concentração de polpas, facilitação no transporte e descarte de rejeitos, recuperação de água para reutilização e recuperação de sólidos (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

2.3 Barragens e novas tecnologias de deposição de rejeitos

Os métodos de disposição de rejeitos historicamente foram problemáticos quanto à impactos ambientais. Com a pressão popular e de órgãos reguladores novas alternativas foram implantadas com o intuito de atender as legislações vigentes, que passaram por deságue de materiais em córregos e os rejeitos grosseiros descarregados em terra. O método a montante costuma ser um dos mais aplicados e conhecidos, onde vão se criando diques (Barreiras) que seguram os rejeitos depositados (Figuras 38 e 39). Atualmente estão se tornando comuns o empilhamento a seco, onde toda a água é reaproveitada e o rejeito seco é empilhado em blocos, resultando em mais segurança e afinidade com os ideais ambientais (WILLS; FINCH, 2016).

Figura 38 - Barragem de rejeitos feita por método a montante (Adaptado)



Fonte: WILLS; FINCH (2016)

Figura 39 - Barragem de rejeitos da Vale realizada por método a montante



Fonte: JÚNIOR (2022)

2.4 Método CEMA

Cada planta de beneficiamento de minério tem suas características, mas as etapas são idênticas, assim como os equipamentos utilizados. Desde a trituração do material feita pelos britadores, passando pelo peneiramento, classificação e concentração até finalizar no tratamento de rejeitos, todas as empresas trabalham com procedimentos semelhantes por se tratar de processos eficiente para o objetivo das mineradoras (SAMPAIO, 2001).

Fica visível o quanto a mineração precisa dos processos e equipamentos trabalhando de forma alinhada e bem dimensionada para evitar gargalos e gastos desnecessários com manutenção. Em paralelo, todas essas atividades precisam atender à capacidade estipulada no planejamento inicial da planta de beneficiamento para que não haja o aproveitamento inadequado da mesma (SILVA, 2020).

O manual CEMA padroniza e orienta o projetista de correia transportadora por meio de um equacionamento disponibilizado que abrange esse tipo de equipamento, incluindo os dispositivos auxiliares. No entanto, não é o método mais aconselhável para transportadores de pequeno porte, onde em muitas ocasiões não são apresentados dados para cálculos de correias com comprimento inferior a 250 pés. Para esses casos, existe um método prático, que é mais simples, mas não será tratado neste projeto (SWINDERMAN, 2007).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado o equacionamento disponibilizado em CEMA e os cálculos serão discutidos quanto ao que representam no dimensionamento de uma correia transportadora. Em paralelo, serão explicadas algumas informações presentes nas tabelas que servirão como base para a retirada de dados necessários para o projeto.

Este capítulo ainda dará suporte ao dimensionamento de uma correia transportadora a ser realizado na seção de resultados a partir de dados de um transportador que se encontra em uma mineradora no estado de Minas Gerais. Esse equipamento está alocado em uma das últimas etapas do processo de beneficiamento, transportando o produto final e o empilhando no solo. Esses dados são importantes, pois se trata de uma correia transportador com aproximadamente 76 metros de comprimento, que é responsável por altos custos de manutenção e que pode ser um dos gargalos da planta, pois qualquer problema sério nesse equipamento interrompe o processo de beneficiamento. O transportador não tem inclinação e o produto final é minério de ferro granulado, com granulometria máxima considerada de 6 polegadas ou 152 mm.

3.1 Dimensionamento da esteira

Inicialmente serão calculados os principais elementos da correia transportadora selecionada, discutida na seção 2.4 e que será explicada com mais detalhes na seção de resultados. Para isso, a base dos cálculos será a vazão de material, por se tratar da principal condição a ser atendida pelo equipamento, considerando o fato de esse ser um parâmetro do processo de beneficiamento. Dessa forma, alguns elementos serão utilizados como base para todo o equacionamento. São eles: tipo e inclinação dos roletes, largura da correia e inclinação do transportador. No entanto, esses mesmos componentes serão modificados durante o presente trabalho a fim de analisar o impacto destes parâmetros no dimensionamento global do sistema.

Os parâmetros utilizados como base para avaliação do equipamento proposto por esse trabalho podem ser divididos em etapas que seguem como referência o manual CEMA, que é reconhecido mundialmente e, no Brasil, validado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Todo o procedimento de cálculo para o dimensionamento do transportador acompanha as etapas presentes no fluxograma (Figura 40), que exhibe o começo dos cálculos definindo as velocidades máxima e mínima até a escolha do conjunto moto-redutor até a avaliação dos

principais parâmetros que contemplam a tensão efetiva que é a base para todo o equacionamento.

Figura 40 - Fluxograma das etapas de cálculo para dimensionamento do equipamento



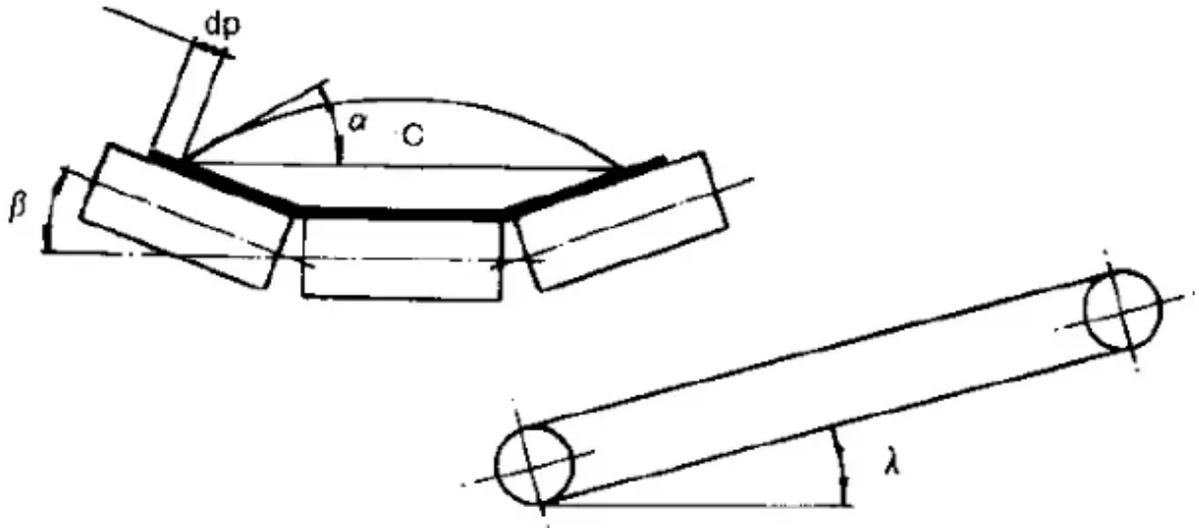
Fonte: Do autor (2023)

O processo inicia-se com a utilização da vazão volumétrica (C) em que o equipamento está exposto, fator extremamente relevante como parâmetro de projeto e que é muito importante para todo o equacionamento que segue. Juntamente com esse dado, são necessárias as informações apresentadas nos tópicos abaixo e na Figura 41, que mostra a disposição do material sobre a correia e os representa com variáveis, possibilitando a comparação com as especificações do transportador que se encontra em campo.

- Peso específico do material (ρ) [t/m^3];
- Velocidade da correia (v) [m/min];
- Largura da correia (l) [pol];
- Capacidade volumétrica do transportador (c) [ton/h];

- Área da seção transversal [pol²] (Função dependente da largura da correia, do número (n) e da inclinação (β) dos roletes e do ângulo de acomodação do material na correia (α));

Figura 41 - Parâmetros descritivos das características de trabalho de roletes



Fonte: FAÇO (1981)

Quando a capacidade volumétrica da correia transportadora não é um dado conhecido, utiliza-se a Tabela 2 que se relaciona com a largura da correia, inclinação dos roletes (β) e ângulo de acomodação do material (α). O aumento desses três fatores isoladamente contribui para o crescimento da capacidade volumétrica, demonstrando proporcionalidade. Isso acontece, porque cabe mais material no transportador e, considerando uma velocidade constante, a vazão aumenta. No entanto, a capacidade volumétrica utilizada no equacionamento será de 160 t/h que é a utilizada no equipamento a que este trabalho se refere. A Tabela 2 é mostrada a fim de complementar a metodologia, porque não são em todos os casos que a capacidade volumétrica é inicialmente delimitada, principalmente quando a velocidade de atividade é especificada.

Tabela 2 - Capacidade volumétrica dos transportadores (C). m³/h a 1,0 m/s.

Roletes	Ângulo de acomodação do material(α)	LARGURA DA CORREIA										
		16"	20"	24"	30"	36"	42"	48"	54"	60"	72"	84"
Com 3 roletes iguais $\beta = 20^\circ$	0°	-	-	58	95	141	197	261	335	418	-	-
	5°	-	-	69	114	169	236	313	401	500	-	-
	10°	-	-	82	134	199	277	367	470	586	-	-
	15°	-	-	94	154	228	316	424	539	672	-	-
	20°	-	-	107	174	258	359	476	609	759	-	-
	25°	-	-	120	196	290	402	533	682	849	-	-
Com 3 roletes iguais $\beta = 35^\circ$	0°	-	-	93	152	226	314	417	535	665	977	1341
	5°	-	-	103	169	250	384	462	592	738	1078	1486
	10°	-	-	114	186	276	384	509	652	812	1186	1631
	15°	-	-	125	204	302	419	556	711	885	1296	1779
	20°	-	-	135	221	328	455	503	772	961	1403	1929
	25°	-	-	147	240	355	492	652	835	1040	1571	2063
Com 3 roletes iguais $\beta = 45^\circ$	0°	-	-	109	179	265	369	490	627	782	1143	1572
	5°	-	-	118	194	287	399	529	678	845	1233	1697
	10°	-	-	128	209	309	430	570	729	909	1326	1822
	15°	-	-	137	224	331	460	610	780	972	1419	1950
	20°	-	-	147	239	354	492	651	833	1038	1514	2079
	25°	-	-	157	255	378	524	694	888	1106	1613	2212
	30°	-	-	166	271	401	556	737	942	1173	1711	2349

Fonte: SWINDERMAN (2007)

Parâmetros como ângulo de carga/acomodação (α) e de repouso/rolete (β) são tabelados de acordo com a Tabela 3, que dispõe sobre as características de trabalho para equipamentos projetados em relação aos principais materiais de transportes. É possível observar que quanto mais lento o fluxo de alimentação, mais material é alimentado por um mesmo período de tempo,

resultando no crescimento do ângulo de carga e de repouso, que também variam de acordo com o material transportado.

Tabela 3 - Variação dos ângulos de carga e repouso de acordo com o fluxo de material

Fluxo				
Fluxo muito livre	Fluxo livre	Fluxo médio		Fluxo lento
Ângulo de carga				
5°	10°	20°	25°	30°
				
Ângulo de repouso				
0-19°	20-25°	30-34°	35-39°	40° - up
Características do material				
Tamanho uniforme, partículas arredondadas muito pequenas, muito úmidas ou muito secas, como areia de sílica seca, cimento, concreto úmido, etc.	Partículas arredondadas, secas e polidas, de peso médio, como grãos integrais e feijões.	Materiais irregulares, granulares ou grumosos de peso médio, como carvão antracito, farelo de algodão, argila, etc.	Materiais comuns típicos, como carvão betuminoso, pedra, a maioria dos minérios, etc.	Material irregular, fibroso, fibroso, intertravado, como cavacos de madeira, bagaço, areia de fundição temperada, etc..

Fonte: SWINDERMAN (2007)

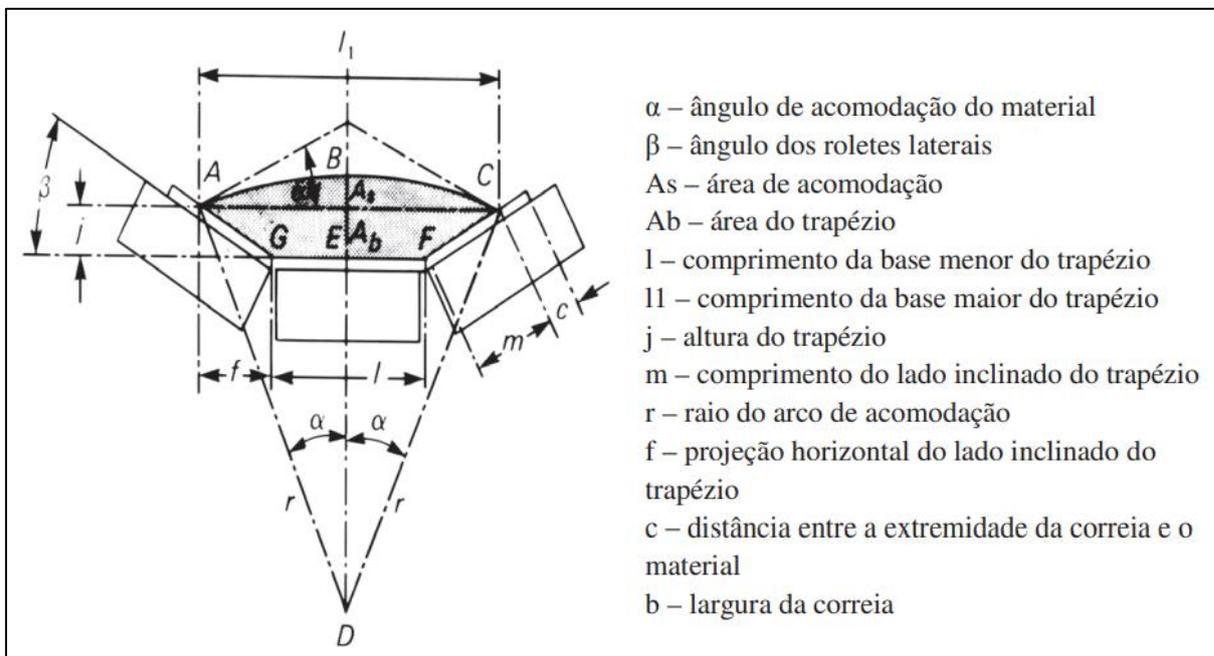
A velocidade máxima é apresentada na Tabela 4 e aumenta com a largura da correia, enquanto a velocidade mínima é calculada para evitar derramamento de material pelas bordas, simulando o carregamento da correia por meio de um trapézio, que representa a forma como o material fica disposto na correia no momento de transporte do mesmo. Na Figura 42 um trapézio é exibido com suas dimensões sendo relacionadas com parâmetros e variáveis necessários para a avaliação do transportador:

Tabela 4 - Velocidade máxima da correia transportadora em função do material transportado da largura da correia

Material transportado	Velocidade da correia (ft/min)	Velocidade da correia (m/s)	Largura da correia
Minérios pesados, duros e pontiagudos	350	1,78	18"
	500	2,54	24" - 36"
	600	3,05	Acima de 36"

Fonte: Adaptado de CARNIZELLO (2011)

Figura 42 - Trapézio de referência para o dimensionamento da correia transportadora



Fonte: CARNIZELLO (2021)

- **Velocidade mínima da correia transportadora**

Nas equações a seguir encontram-se as regras trigonométricas que determinam os valores necessários para o cálculo de velocidade da correia transportadora por meio do trapézio apresentado anteriormente. Como pode ser visto abaixo, o cálculo fornece a velocidade mínima da correia. É considerado que o volume de material alimentado no transportador em determinado período de tempo será compatível com sua capacidade desde que a velocidade mínima não seja menor que a calculada, evitando derramamento.

- **Cálculo da velocidade mínima da correia transportadora**

É importante definir a velocidade mínima, pois abaixo dela, mantendo a vazão constante, o transportador não conseguiria transportar o material antes que ele derrame pelas laterais da correia. Dessa forma, existe uma velocidade limite para que isso não ocorra que é mostrada na Equação 1:

$$v = \frac{Q}{At \cdot \rho} \quad (1)$$

v : Velocidade requerida da correia [ft/s]

Q : capacidade do transportador [lb/s]

At : área total da seção transversal carregada [ft²]

ρ : densidade do material [lb/ft³]

- **Cálculo da área total da seção transversal carregada**

Para se obter a velocidade mínima necessária para a correia transportadora é preciso entender como se caracteriza a seção do material sobre a correia, que nesse caso pode ser representada por uma seção trapezoidal (Ab) e uma área de acomodação (As). Por meio disso e juntamente com a capacidade do transportador será possível o cálculo das velocidades possíveis para o equipamento.

$$At = Ab + As \quad (2)$$

Ab : Área do trapézio [pol²]

As : Área de acomodação [pol²]

- **Área do trapézio (Ab)**

Como dito anteriormente, o trapézio é uma seção utilizada para simular a disposição do material no transportador. Dessa forma, os cálculos das velocidades do equipamento, que dependem da quantidade de material suportado pela correia, se relacionam com a área da seção transversal de material carregado, como representado abaixo. Dois fatores são bem relevantes para essa área e impactam muito a velocidade mínima e vazão da correia transportadora. Tanto a largura da correia quanto a inclinação dos roletes delimitam o quanto de material cabe em

uma seção de correia, pois quanto mais material sobre a mesma, menor é a velocidade necessária para manter uma vazão constante.

$$Ab = \left(\frac{l+l1}{2}\right) * j \quad (3)$$

$$c = 0,055 * b + 0,9 \quad (4)$$

$$l = 0,371 * b + 0,25 \quad (5)$$

$$b = l + 2 * m + 2 * c \quad (6)$$

$$l1 = l + 2 * f \quad (7)$$

$$f = m * \cos\beta \quad (8)$$

$$j = m * \sen\beta \quad (9)$$

l1: Comprimento da base maior do trapézio [pol];

l: Comprimento da base menor do trapézio [pol];

b: Largura da correia [pol];

m: Comprimento do lado inclinado do trapézio [pol];

c: Distância entre a extremidade da correia e o material [pol];

f: Projeção horizontal do lado inclinado do trapézio [pol];

j: Altura do trapézio [pol];

β : Ângulo dos roletes laterais [°].

- **Área de acomodação (*As*)**

A área de acomodação reproduz a seção superior do material disposto sobre a correia. Esse parâmetro mostra a influência do ângulo de acomodação e do raio que a seção circular que o material forma sobre a correia têm para (*As*) e, conseqüentemente, para a velocidade mínima do transportador. Dessa forma, o cálculo da área circular é realizado multiplicando a área de uma seção circular pela fração de seção a que ela se refere, enquanto a área do setor triangular é calculado multiplicando a altura pela base e dividindo por 2, o que resulta na formulação abaixo.

As = Área do setor circular – Área do triângulo

$$As = \frac{\pi * r^2 * 2 * \alpha}{360} - \frac{r * \sen 2\alpha}{2} \quad \text{onde } r = \frac{l1}{2 * \sen \alpha} \quad (10)$$

3.2 Seleção e espaçamento de roletes

Para Carnizello (2011) os roletes são importantes componentes para a correia transportadora e alguns aspectos interferem nas condições de trabalho do mesmo, como:

- Tipo de serviço;
- Condições de operação;
- Carga;
- Velocidade da correia.

O espaçamento entre os roletes é tabelado e impactam a flexão da correia e o derramamento de materiais, dois pontos relevantes que serão discutidos a seguir. Além disso, esse fator delimita a quantidade de roletes dispostos em um transportador, influenciando no custo de manutenção do equipamento.

3.2.1 Carga aplicada no rolete

Inicialmente é calculada a força aplicada no rolo de carga escolhido. A Tabela 5 demonstra que o fator $K1$ aumenta com o peso específico e com a granulometria do material. O crescimento desses dois fatores exige mais dos roletes, impactando $K1$ que é um fator de ajuste devido ao tamanho do grão do material transportado e aumentando a força aplicada sobre os rolos.

$$CRc = (Wb + (Wm * K1) * SI) \quad (11)$$

Tabela 5 - Fator referente a granulometria máxima do grão (*KI*)

Tamanho máximo do grão (Polegadas)	PESO DO MATERIAL, lbs/cu ft						
	50	75	100	125	150	175	200
4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1
6	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1
8	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
10	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.2
12	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.4	1.3
14	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.5	1.3
16	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.6	1.4
18	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.7	1.4

Fonte: Adaptado de SWINDERMAN (2007)

A capacidade de carga representa o peso que os roletes conseguem sustentar exercendo as atividades a que são propostos. A variação da largura da correia e do ângulo de passagem altera a quantidade de material sobre a correia, o que resulta na variação do peso sobre os roletes, modificando a capacidade de carga deles em cada situação mostrada na Tabela 6 que apresenta a capacidade máxima a que os rolos conseguem atender.

Tabela 6 - Capacidade de carga [lb] em função do ângulo de passagem (Ângulo de inclinação dos roletes (β)) e largura da correia e tipo de roletes (Série C) [lb] (Capacidades baseadas em uma vida mínima de 30.000 horas a 500 rpm)

Largura da correia (Polegada)	Ângulo de passagem (β)			Rolo de retorno simples [mm]	Rolo de retorno duplo [mm]
	20°	35°	45°		
18	900	900	900	475	-
24	900	900	900	325	500
30	900	900	900	250	500
36	900	837	810	200	500
42	850	791	765	150	500
48	800	744	720	125	500
54	750	698	675	*	500
60	700	650	630	*	500
66				*	500
72				*	*

Fonte: SWINDERMAN (2007)

3.2.2 Classificação de roletes

Os roletes devem ser selecionados de acordo com as características de projeto e operação. Correias mais largas exigem mais dos roletes por suportarem uma carga maior. As condições de trabalho envolvem o tipo de material que a correia transporta, velocidade de trabalho, situações externas a que está exposta e variam de trabalho leve até trabalho pesado. Dessa forma, os roletes são divididos em classes para facilitar a seleção dos mesmos de acordo com os parâmetros citados e mostrados na Tabela 7:

Tabela 7 - Classificação de roletes

Classificação	Nº de série	Diâmetro do rolete (Polegada)	Largura da correia (Polegada)	Descrição
A4				
A5				
B4	II	4	18" - 48"	Trabalho leve
B5	II	5	18" - 48"	Trabalho leve
C4	III	4	18" - 60"	Trabalho médio
C5	III	5	18" - 60"	Trabalho médio
C6	IV	6	24" - 60"	Trabalho médio
D5	None	5	24" - 72"	Trabalho médio
D6	None	6	24" - 72"	Trabalho médio
E6	VI	6	36" - 96"	Trabalho pesado
E7	VI	7	36" - 96"	Trabalho pesado

Fonte: SWINDERMAN (2007)

3.2.3 Espaçamento de roletes

O espaçamento recomendado para os roletes é mostrado na Tabela 8. A escolha incorreta desse fator pode resultar no aumento de consumo do motor ou custos resultantes do número excessivo de rolos. Pode-se observar que o aumento da largura da correia e densidade do material resulta na redução do espaçamento entre os roletes. Isso ocorre devido ao aumento de carga que resulta do aumento desses parâmetros, que tensiona mais a correia, dificultando o tensionamento da mesma e exigindo mais dos roletes.

Tabela 8 - Espaçamento de roletes devido às condições de operação

Largura da correia (Polegadas)	ESPAÇAMENTO DE ROLETES [ft]						Roletes de retorno[ft]
	Peso da porção de material, lbs/cu ft						
	30	50	75	100	150	200	
18	5.5	5.0	5.0	5.0	4.5	4.5	10.0
24	5.0	4.5	4.5	4.0	4.0	4.0	10.0
30	5.0	4.5	4.5	4.0	4.0	4.0	10.0
36	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.5	10.0
42	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	10.0
48	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	10.0
54	4.5	4.0	3.5	3.5	3.0	3.0	10.0
60	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	2.5	10.0
72	4.0	3.5	3.5	3.0	2.5	2.0	8.0
84	3.5	3.5	3.0	2.5	2.5	2.0	8.0
96	3.5	3.5	3.0	2.5	2.0	2.0	8.0

Fonte: SWINDERMAN (2007)

3.3 Peso estimado da correia

Com a definição dos dados de largura da correia e da densidade do material é possível encontrar o peso estimado da mesma, livre de material, por meio da Tabela 9. Como dito anteriormente, o aumento da largura da correia e da densidade do material impactam na capacidade do transportador, exigindo mais da correia, o que em muitas situações resulta no crescimento de peso da mesma.

Tabela 9 – Peso estimado da correia [lb/ft] em função da densidade do material transportado e da largura da correia

Largura da correia (Polegadas)	MATERIAL TRANSPORTADO, lbs/ft ³		
	30-74	75-129	130-200
18	3.5	4.0	4.5
24	4.5	5.5	6.0
30	6.0	7.0	8.0
36	9.0	10.0	12.0
42	11.0	12.0	14.0
48	14.0	15.0	17.0
54	16.0	17.0	19.0
60	18.0	20.0	22.0
72	21.0	24.0	26.0
84	25.0	30.0	33.0
96	30.0	35.0	38.0

Fonte: SWINDERMAN (2007)

- **Cálculo do peso do material**

O peso do material (W_m) [lbs/ft] sobre a correia é calculado com os dados encontrados anteriormente, que são a velocidade da correia (V) [ft/min] e capacidade do transportador (Q) [ton/h] a partir da Equação 12 de conservação de massa (continuidade):

$$W_m = \frac{Q \cdot 2000}{60 \cdot V} \quad (12)$$

- **Cálculo da carga aplicada nos roletes (CRc)**

Com o peso do material transportado (W_b) [lbs/ft] e o espaçamento entre os roletes (S_i) [ft] tabelados anteriormente, calcula-se a carga aplicada no rolete de retorno (CR_r). Posteriormente, encontra-se a força aplicada nos roletes de carga (CR_c), e valida-se a condição de trabalho em um ciclo de 30000 horas, atendendo a vida útil estipulada em SWINDERMAN (2007) para transportadores contínuos. Esse parâmetro é importante para garantir o desempenho operacional do equipamento, pois não suportar as condições de serviço faz que os roletes

precisem ser trocados com alta frequência, ocasionando em custos de parada de planta e manutenção. O aumento do espaçamento dos rolos e do peso da correia diminuem a vida útil dos roletes por exporem os mesmos às condições mais críticas de trabalho, como pode ser visto na Equação 13. Isso ocorre, pois haverá menos roletes para atender a mesma quantidade de carga:

$$CRr = Wb * Si \quad (13)$$

3.4 Cálculo de tensão efetiva da correia

A tensão efetiva (Te) [lbs] é uma força, comumente tratada como tensão pelos fabricantes de correias para auxiliar os cálculos, e representa a soma dos principais esforços sofridos pelo transportador. É calculada por meio das tensões resultantes referentes às resistências em cada trecho do equipamento. Esse dado é importante para o dimensionamento dos equipamentos de acionamento da correia transportadora, como motores, redutores, tambores, dentre outros componentes. O somatório das forças presentes é explicado abaixo:

$$Te = Tx + Tyb + Tym + Tm + Tp + Tam + Tac \quad (14)$$

Tx – Tensão devido ao atrito entre a correia e os roletes [lbs];

Tyb – Tensão devido a resistência à flexão da correia em contato com os roletes [lbs];

Tym – Tensão devido a resistência à flexão do material transportado conforme se move pelos roletes [lbs];

Tm – Tensão relativa à elevação do material [lbs];

Tp – Tensão resultante do dobramento da correia e ao atrito do eixo do tambor com o mancal [lbs];

Tam – Tensão do impacto do material com a correia no carregamento [lbs];

Tac – Tensões devido aos acessórios do transportador [lbs].

3.4.1 Tensão devido ao atrito entre a correia e os roletes (Tx)

No momento de atuação do transportador, a correia exerce esforço sobre os roletes, que giram, facilitando o deslocamento da mesma. Essa força de contato se caracteriza pela tensão (Tx), que aumenta com o comprimento da correia, pois esse fator é responsável pela

quantidade de roletes no equipamento impactando na resistência ao rolamento. Os rolos também têm o desempenho impactado por fatores ambientais e limitações do próprio elemento, como os rolamentos internos, por exemplo. Esses pontos são representados pelas constantes “ Kt ” e “ Kx ”, respectivamente.

$$Tx = L * Kx * Kt \quad (15)$$

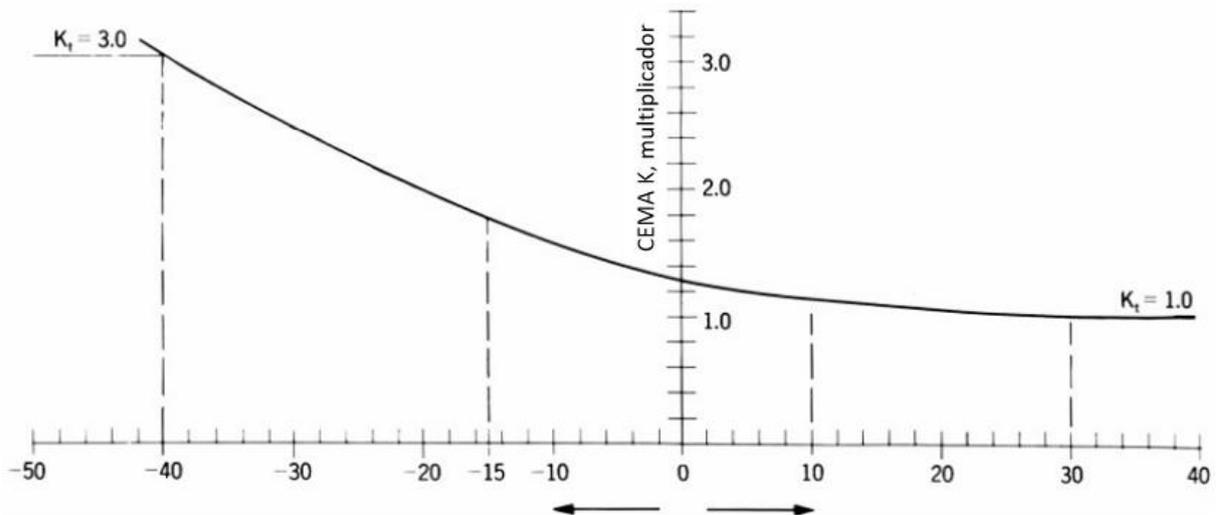
L – Comprimento do transportador [ft];

Kx – Coeficiente de escorregamento de roletes [lbs/ft]

Kt – Fator de correção da temperatura

O fator de correção da temperatura pode ser retirado da Figura 43, onde deve ser considerada a temperatura média da região de implantação da correia transportadora. Isso acontece, porque as condições ambientais, principalmente a temperatura, afetam o ciclo de vida dos componentes do transportador, o que pode ser visto abaixo com o fator Kt variando bastante em temperaturas muito baixas, apesar de se tornar quase constante após 0 Farenheit.

Figura 43 - Fator de correção de temperatura (Kt) em Farenheit



Fonte: SWINDERMAN (2007)

Para Kx [lbs/ft], que é o fator de escorregamento do material, quanto maior o peso sobre os roletes, mais difícil é para mover a correia sobre eles. Em contrapartida, aumentar o espaçamento dos rolos facilita o movimento da correia sobre os mesmos, o que pode ser visto na equação abaixo:

$$Kx = 0,00068 * (Wb + Wm) + \frac{Ai}{Si} \quad (16)$$

Ai : Força necessária para girar os rolos [lbs] (Fixada para os rolos padrão CEMA)

$Ai = 1,5$ para rolos de 6" Ø, Série CEMA C6, D6;

$Ai = 1,8$ para rolos de 5" Ø, Série CEMA B5, C5, D5;

$Ai = 2,3$ para rolos de 4" Ø, Série CEMA B4, C4;

$Ai = 2,4$ para rolos de 7" Ø, Série CEMA E7;

$Ai = 2,8$ para rolos de 6" Ø, Série CEMA E6;

$Ai = 0$ para transportadores declinados (Regenerativos).

3.4.2 Tensão devido a resistência à flexão da correia em contato com os roletes (Tyb) [lbs]

A correia deforma, arqueando (acomodando-se) sobre os roletes, aumentando o atrito entre os dois componentes, representado por Tyb , que depende das tensões dos roletes de carga " Tyc " e dos roletes de retorno " Tyr ". Esse fator ocorre da mesma forma que o último parâmetro calculado, por depender das limitações mecânicas dos roletes e das condições ambientais que afetam o desempenho deles, sendo representadas por " Ky " e " Kt ". Também como nos casos anteriores, tanto o peso como o comprimento da correia também aumentam " Tyb " por influenciarem na carga distribuída a que o equipamento estará exposto.

$$Tyb = Tyc + Tyr \quad (17)$$

Tyc : Tensão dos roletes de carga [lbs];

$$Tyc = L * Ky * Wb * Kt \quad (18)$$

Tyr : Tensão dos roletes de retorno [lbs];

$$Tyr = L * 0.015 * kt * (Ky + 0.015) \quad (19)$$

Dessa forma:

$$Tyb = L * Wb * kt * (Ky + 0,015) \quad (20)$$

Onde K_y é um fator de carga tabelado utilizado no cálculo de resistência durante a alimentação do transportador. O manual CEMA dispõe o coeficiente “ K_y ” para transportadores que variam de 250 a 3000 ft de comprimento, pois trata-se de escalas industriais. A Tabela 10 mostra que o principal parâmetro que interfere o fator de carga é a variação da inclinação. Os outros fatores têm uma correlação menor ou não se relacionam de forma linear com K_y ou que esse fator tem pouco impacto para a “indentação” da correia.

Tabela 10 - Fator de carga K_y

Comprimento da correia (ft)	$W_b + W_m$ (lbs/ft)	Inclinação percentual						
		0	3	6	9	12	24	33
		Ângulo do transportador em relação ao eixo horizontal						
		0	2	3.5	5	7	14	18
250	20	0.035	0.035	0.034	0.031	0.031	0.031	0.031
	50	0.035	0.034	0.033	0.032	0.031	0.028	0.027
	75	0.035	0.034	0.032	0.032	0.030	0.027	0.025
	100	0.035	0.033	0.032	0.031	0.030	0.026	0.023
	150	0.035	0.035	0.034	0.033	0.031	0.025	0.021
	200	0.035	0.035	0.035	0.035	0.032	0.024	0.018
	300	0.035	0.035	0.035	0.035	0.033	0.021	0.018
400	20	0.035	0.034	0.032	0.030	0.030	0.030	0.030
	50	0.035	0.033	0.031	0.029	0.029	0.026	0.025
	75	0.034	0.033	0.030	0.029	0.028	0.024	0.021
	100	0.034	0.032	0.030	0.028	0.028	0.022	0.019
	150	0.035	0.034	0.031	0.028	0.027	0.019	0.016
	200	0.035	0.035	0.033	0.030	0.027	0.016	0.014
	300	0.035	0.035	0.034	0.030	0.026	0.017	0.016

Fonte: SWINDERMAN (2007)

3.4.3 Tensão devido à resistência à flexão do material transportado conforme se move pelos roletes (T_{ym})

O esforço causado pelo material na correia, resulta em sua flexão sobre os roletes, aumentando o atrito, resultando em uma força que deforma a correia gerando uma “barriga” na mesma, sendo representada por T_{ym} [lbs]. Como esperado, transportadores mais compridos possibilitam maior acúmulo de material, o que reflete na resistência à flexão, assim como o peso do próprio material e das condições ditas anteriormente, que compõe “ K_y ”.

$$T_{ym} = L * K_y * W_m \quad (21)$$

3.4.4 Tensão relativa à elevação do material (T_m)

A tensão (T_m) [lbs] consiste-se na força necessária para elevar o material do ponto de carregamento ao ponto de descarga. Quanto maior altura, mais difícil é transportar o material, exigindo da potência do motor, assim como o aumento de peso do material sobre a correia também demanda mais do consumo do equipamento.

$$T_m = H * W_m \quad (22)$$

H : Desnível entre entrada e saída da correia [ft]

3.4.5 Tensão resultante do dobramento da correia e ao atrito do eixo do tambor com o mancal (T_p)

A tensão necessária para girar o tambor depende da localização e do ângulo de abraçamento, de acordo com o apresentado na Tabela 11. A mesma é conhecida como “ T_p ” e ocorre quando o tambor é acionado pelo motor e transfere o movimento para a correia por meio do contato e soma-se ao atrito do eixo do tambor com o mancal de sustentação do mesmo. Tambores pressionados tracionam mais a correia, resultando no aumento de tensão e fazendo que o aumento da quantidade desses elementos demande de mais potência.

Tabela 11 - Tensão necessária para girar os tambores

Local dos tambores	Angulação com a correia	Tensão na correia
Lado pressionado	150° a 240°	200 lbs/Tambor
Lado folgado	150° a 240°	150 lbs/Tambor
Outros tambores	Menor que 150°	100 lbs/Tambor

Nota: Dobrar os valores acima para eixos de polia que não operam com mancais antifricção

Fonte: SWINDERMAN (2007)

Com isso, é somada a carga referente a cada tambor presente no equipamento:

$$T_p = \sum_1^n q * P_t \quad (23)$$

q = Quantidade de tambores

P_t = Tensão resultante do tambor [lbs]

3.4.6 Tensão do impacto do material com a correia no carregamento (T_{am})

Um dos pontos mais críticos é o local de alimentação da correia, onde a mesma sofre o impacto do carregamento do material, resultando no esforço adicional para movimentação do material nesse momento inicial. A velocidade inicial é tratada como zero, mas depende do modo de alimentação de cada correia, que influencia na velocidade inicial do material sobre a correia. Outro fator que influencia esse parâmetro é a velocidade da correia que exige mais do equipamento, além das próprias características do material.

$$T_{am} = \frac{Q \cdot 2000}{g \cdot 3600} * \frac{V - V_o}{60} \quad (24)$$

g = Aceleração da gravidade [ft/s²]

Q = Capacidade do transportador [ton/h]

V : Velocidade final da correia [ft/min]

V_o = Velocidade inicial [ft/min]

3.4.7 Tensões devido aos acessórios do transportador (T_{ac})

Os acessórios de limpeza (limpadores e raspadores) do transportador e a guia são responsáveis por alto esforço de atrito do sistema, pois esses componentes ficam em contato contínuo com a correia, o que gera uma tensão derivada da resistência ao deslocamento causada por esses componentes, que sofre influência do atrito apresentado na Tabela 12. Dessa forma, quanto mais componentes de limpeza e quanto maior a guia na área de alimentação, maior o valor da tensão relacionada aos acessórios.

$$T_{ac} = T_{sb} + T_{pl} + T_{bc} \quad (25)$$

T_{sb} : Tensão de atrito da guia [lbs]

$$Tsb = Lb * (Cs * hs^2 + 6) \quad (26)$$

Lb: Comprimento da guia de alimentação [ft]

hs: Altura do material em contato com a guia [ft]

Cs: Fator de atrito da guia com o material transportado (Coeficiente tabelado)

Tabela 12 - Coeficiente de atrito entre guia e material

Material	Fator Cs
Alumina, pulv. Seco	0.1210
bauxita, terra	0.0571
Argila, cerâmica, finos secos	0.0924
Grãos, trigo, milho ou centeio	0.0433
Minério de ferro, 200 lbs/cu ft	0.0276
Amido, pequenos pedaços	0.0623
Açúcar, granulado seco	0.0349

Fonte: Adaptado de SWINDERMAN (2002)

- ***Tpl*: Tensão devido aos limpadores [lbs] (Tabela 13)**

Quanto mais limpadores e maior a área de contato com os mesmos em relação à correia, mais é demandado da potência do equipamento. Isso, porque esses elementos estão constantemente raspando a correia para limpeza do material agarrado, diferenciando dos raspadores apenas pela posição deles no transportador, ficando estes na região central do equipamento.

$$Tpl = \sum_1^n ql * lc \quad (27)$$

n: Número de limpadores

ql: Força de atrito dos limpadores [lbs/pol]

lc: Largura de correia [pol]

- ***Tbc*: Tensão devido aos raspadores [lbs]**

Os raspadores compartilham das mesmas características dos limpadores quando o assunto é consumo de potência. Maior área de contato e mais componentes exigem mais do motor.

$$Tbc = \sum_1^n qr * lc \quad (28)$$

n: Número de raspadores

qr: Força de atrito dos raspadores [lbs/pol]

lc: Largura de correia [pol]

Tabela 13 - Força necessária para vencer o atrito dos limpadores de correia

Tipo de limpador	Tensão resultante dos limpadores (lbs/comprimento de correia)
Limpador em V, completo ou inclinado simples, removendo todo o material da correia	5.0
Limpador parcial em V ou simples, removendo meio material da esteira	3.0

Fonte: SWINDERMAN (2007)

3.5 Cálculo de flexão da correia entre os roletes (SAG)

Para evitar que o material escoe pelos lados do transportador é necessário que a flexão máxima da correia entre os roletes de carga (*y*) [ft] seja menor que 3% do valor do espaçamento. Dessa forma, é importante calcular esse fator para avaliar o dimensionamento do transportador. A equação deixa evidente a forte contribuição do peso da correia e do material para (*y*) por pressionarem a correia pelos roletes, mas o espaçamento (*Si*) influencia ainda mais esse fator por proporcionar a “indentação” ou “barriga”.

$$y = \frac{Si^2 * (Wb + Wm)}{8 * Te} \quad (29)$$

*É importante ressaltar que *Wb + Wm* tem unidade lbs/ft, validando o dimensionamento das unidades da equação.

3.6 Cálculo da potência requerida

Determinar a potência requerida pelo sistema é fundamental para a seleção do conjunto moto-redutor mais adequado para o acionamento da correia transportadora e o tambor de acionamento ideal para a aplicação. A própria equação demonstra que o aumento da tensão efetiva ou da velocidade de trabalho do transportador faz que o equipamento consuma mais.

$$Pot = \frac{Te*v}{33000} \quad (30)$$

Pot: Potência requerida do sistema [hp]

Te: Tensão efetiva na correia [lbs]

v: Velocidade da correia [ft/min]

3.7 Torque de acionamento

O conjunto moto-redutor precisa, além de potência, proporcionar torque o suficiente para acionar o transportador. Caso contrário, o equipamento não consegue iniciar o movimento, garantindo a operação do mesmo. Alguns dispositivos podem ser utilizados para amenizar o pico de corrente que ocorre nesse momento e em algumas situações são utilizados acoplamentos que amenizam o desgaste mecânico e a confiabilidade dos componentes que são altamente demandadas nessa etapa do funcionamento da correia transportadora. Para essa análise é utilizada a Equação 31:

$$\tau = \frac{30 \times P}{\pi \times n} \quad (31)$$

τ = Torque [N.m]

n = Rotação [rpm]

P = Watt

3.8 Discussão sobre a metodologia

Na última seção foi apresentado o equacionamento para o cálculo da tensão efetiva para dimensionamento do conjunto moto-redutor. Foram discutidos os efeitos de alguns parâmetros

do processo e do equipamento nas tensões calculadas e como eles influenciam as variáveis das equações disponibilizadas no método CEMA. Mesmo que de forma intuitiva, foi possível observar alguns fatores relevantes para o consumo de potência do equipamento, como os roletes e as características da correia, além de entender que condições ambientais também afetam o transportador e seus componentes.

Na próxima seção toda essa relação será aprofundada com a atribuição de valores que irão representar melhor o consumo de cada fator e o impacto mais assertivo dos parâmetros discutidos no consumo de potência. Além disso, eles serão comparados para avaliação específica de cada um e do comportamento em conjunto desses critérios no gasto energético.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo todo o equacionamento apresentado anteriormente será utilizado para análise do dimensionamento de uma correia transportadora que se apresenta em atividade em uma mineradora que atua no estado de Minas Gerais. O principal dado utilizado é a capacidade volumétrica do transportador que foi retirado a partir do maior valor encontrado nos últimos doze meses. Esse equipamento atua em uma das últimas etapas do processo de beneficiamento, despejando minério de ferro granulado em pilha no solo. Como todo o material granulado passa por essa correia, ela se torna um gargalo em caso de paradas para manutenção corretiva ou ações desse tipo.

O transportador é horizontal, sem nenhuma inclinação, e possui 70 metros de comprimento. Fazem parte do equipamento roletes de carga e de retorno e raspadores, mas não possui limpadores. Está assentado em uma mina a céu aberto, exposto às variações climáticas. Um dos principais fatores que motivou este trabalho é o alto custo apresentado por esse tipo de transportador e a seção de resultados busca analisar o que influencia esse fato.

4.1 Estudo da potência consumida pela correia transportadora

4.1.1 Parâmetros de funcionamento do equipamento

Para avaliação do equipamento a que esse trabalho se refere serão necessários alguns dados do processo e da correia transportadora. Essas informações serão utilizadas inicialmente como base para o equacionamento, mas também serão alteradas posteriormente com o propósito de avaliação do impacto dessas modificações. Os elementos citados estão fixados abaixo:

- Comprimento do transportador: 70 metros
- Largura da correia: 24 polegadas
- Regime de trabalho: 24h/dia – 365 dias/ano
- Inclinação dos roletes: 35° (Roletes de carga)
- Comprimento da guia: 3 metros
- Altura da guia: 0,5 metros

*Tanto MOINO (2018) quanto SANTOS e MALAGONI (2014) ressaltam a perda de desempenho a partir do aumento da inclinação de 15°

- Material: Minério de ferro granulado
- Capacidade de carga: 160 ton/h = 97,98 lbs/s
- Densidade do minério de ferro: 2,4 ton/m³ = 150 lb/ft³
- Granulometria do minério de ferro: 150mm = 5,9 pol

4.1.2 Velocidades do equipamento

A velocidade máxima foi definida anteriormente por meio da Tabela 5 que considera as características do material transportado e largura da correia. Dessa forma, tem-se:

$$V_m = 500 \text{ ft/min} = 2,54 \text{ m/s} \quad (32)$$

Em que V_m : Velocidade Máxima (ft/min)

O cálculo da velocidade mínima necessita da área de acomodação (A_s) e da área do trapézio (Ab):

*Largura da correia (b): 24”

$$c = 0.055 * 24 + 0.9 = 2.22 \text{ pol} \quad (33)$$

$$l = 0.371 * 24 + 0.25 = 9.15 \text{ pol} \quad (34)$$

$$b = l + 2 * m + 2 * c \text{ onde } m = \frac{(-l+b-2*c)}{2} = \frac{(9.15-24+2*2.22)}{2} = 5.20 \text{ pol} \quad (35)$$

$$f = 5.20 * \cos 35 = 4.26 \text{ pol} \quad (36)$$

$$j = 5.20 * \sin 35 = 2.98 \text{ pol} \quad (37)$$

$$l1 = 9.15 + 2 * 2.07 = 17.68 \text{ pol} \quad (38)$$

Com os dados encontrados, pode-se obter a área do trapézio (Ab):

$$Ab = \left(\frac{9.15+17.68}{2} \right) * 2.98 = 40.04 \text{ pol}^2 \quad (39)$$

Cálculo da área de acomodação:

$$A_s = \text{Área do setor circular} - \text{Área do triângulo} \quad (40)$$

$$r = \frac{17.68}{2 \cdot \sin 25} = 20.91 \text{ pol} \quad (41)$$

$$A_s = \frac{\pi \cdot 20.91^2 \cdot 2 \cdot 25}{360} - \frac{20.91^2 \cdot \sin(2 \cdot 25)}{2} = 23.31 \text{ pol}^2 \quad (42)$$

- *Área total (At)*

$$A_t = 40.04 + 23.31 = 63.34 \text{ pol}^2 \quad (43)$$

- *Velocidade mínima*

$$v = \frac{97.98}{63.31 \cdot 150} = 1.47 \frac{ft}{s} = 0,45 \text{ m/s} \quad (44)$$

Encontrados os limites superior e inferior da velocidade da correia, é possível determinar um valor de trabalho que será utilizado para o dimensionamento da esteira.

Limite inferior: 0,45 m/s = 1,47 ft/s = 88.47 ft/min

Limite superior: 2,54 m/s

Velocidade selecionada: 3,00 m/s = 9.84 ft/s = 590.55 ft/min

*Essa foi a velocidade escolhida de forma a atender uma situação mais crítica. Com isso, espera-se que velocidades mais baixas que a selecionada exigirá menos do equipamento e seus componentes.

4.1.3 Seleção de roletes

As informações abaixo foram selecionadas de acordo com as tabelas disponíveis em SWINDERMAN (2007) e listadas na metodologia, considerando a largura da correia, características do material transportado e condições de operação.

- A classe dos roletes que compõe o transportador é a C5, com mais informações disponíveis por meio da Tabela 7 que classifica os roletes a partir dos dados de largura da correia e condições de trabalho a que estarão expostos:
- Com as informações da largura da correia, ângulo de inclinação dos roletes (β) e granulometria máxima do minério de ferro encontra-se pelas Tabela 8 e Tabela 9 as informações de;

Capacidade de carga:

Roleta de carga: 900 lbs;

Roleta único de retorno: 475 lbs.

Fator de ajuste devido ao tamanho do grão (K1): 1,1

Espaçamento dos roletes de carga: 4.0 ft = 1,22 m

Espaçamento dos roletes de retorno: 10.0 ft = 3,01 m

Peso estimado da correia (Wb): 6 lbs/ft = 8,94 kg/m

4.1.4 Cálculo do peso do material (Wm)

$$Wm = \frac{160 \cdot 2000}{60 \cdot 88.47} = 60.29 \frac{lbs}{ft} = 89,72 \frac{kg}{m} \quad (45)$$

4.1.5 Carga aplicada nos rolos de carga (CRc)

$$CRc = (6.0 + (60.29 \cdot 1.1) \cdot 4.0) = 271.25 lbs \quad (46)$$

4.1.6 Carga aplicada nos rolos de retorno (CRr)

$$CRr = 6.0 \cdot 6.0 = 24.00 lbs \quad (47)$$

4.1.7 Validação dos roletes utilizados

Calculando a razão entre a carga calculada e a capacidade de carga tabelada é possível verificar se a vida útil dos rolamentos atenderá o limite de 30.000 horas. Em caso afirmativo, o valor resultante deve ser menor que um.

$$Razão_CRc = \frac{271.25}{1200} = 0.23 \quad (48)$$

$$Razão_CRr = \frac{24}{600} = 0.04 \quad (49)$$

Os roletes escolhidos atendem as condições de operação do sistema, mas como proposta do trabalho, outros tipos e espaçamentos de roletes poderão ser avaliados para análise do efeito da aplicação de diferentes cargas nos rolos.

4.2 Cálculo da tensão efetiva na correia

4.2.1 Fator de temperatura K_t

Para determinar o valor de K_t , necessário na sequência de operações, será considerada a temperatura média da planta onde o transportador está implantado como 25°C, que é equivalente a 77 F. Dessa maneira é possível encontrar o fator $K_t = 1$ tabelado anteriormente. Mesmo em temperaturas mais altas, K_t se mantém constante com valor igual a 1. Temperatura muito baixas têm impacto maior nesse coeficiente.

4.2.2 Fator de correção K_x

Outro fator essencial para as operações é K_x , calculado abaixo com o valor do troque necessário para girar os rolos “ A_i ” encontrado por meio de definição de SWINDERMAN (2007), comentado e tabelado na metodologia na seção 3.4.1:

$$K_x = 0.00068 * (6.0 + 60.29) + \frac{1.8}{4.0} = 0.49 \frac{lb}{ft} \quad (50)$$

4.2.3 Tensão devido ao atrito da correia em contato com os roletes (T_x)

$$T_x = 229.60 * 0.49 * 1 = 113.67 \text{ lbs} \quad (51)$$

4.2.4 Tensão devido à resistência à flexão da correia em contato com os roletes (T_{yb})

Para o cálculo de “ T_{yb} ” é necessário encontrar “ K_y ”, tabelado durante a metodologia.

$$T_{yb} = 229.60 * 6.0 * 1 * (0.035 + 0.015) = 68.88 \text{ lbs} \quad (52)$$

Para o fator “ K_y ” foi necessária uma interpolação, pois a norma não contempla dimensões de comprimento menores que 250 ft. Dessa forma, o valor selecionado para o decorrer dos cálculos foi baseado na pior condição possível para o equipamento, contemplando a segurança dos componentes presentes no mesmo. O resultado estipulado com o apoio da tabela foi $K_y = 0,035$.

4.2.5 Tensão devido à resistência à flexão do material conforme ele se move sobre os roletes (T_{ym})

$$T_{ym} = 229.60 * 0.035 * 60.29 = 484.45 \text{ lbs} \quad (53)$$

4.2.6 Tensão relativa à elevação do material (T_m)

$$T_m = 0.00 * 60.29 = 00.00 \text{ lbs} \quad (54)$$

*O resultado nulo ocorre pelo fato de o transportador não ser inclinado, fazendo que a altura do mesmo seja zero.

4.2.7 Tensão resultante do dobramento da correia e ao atrito do eixo do tambor com o mancal (T_p)

Para o equacionamento serão considerados um tambor de acionamento, um de retorno e um de esticamento, pois esses são os parâmetros do equipamento estudado. Com essas informações juntamente da Tabela 11 apresentada anteriormente, tem-se:

$$Tp = 2 * 200 + 1 * 150 = 550 \text{ lbs} \quad (55)$$

4.2.8 Tensões devido aos acessórios do transportador (Tac)

$$Tac = Tsb + Tpl + Tbc \quad (56)$$

$$Tsb = 9.84 * (0.2760 * 1.64^2 + 6) = 66.34 \text{ lbs} \quad (57)$$

Lb : Comprimento da guia de material (Ft): 3 m = 9.84 ft

Hs : Altura de material em contato com a guia (Ft): 0,50m = 1.64 ft

Cs : Fator de atrito tabelado (Tabela 13): 0.2760

Considerando a não utilização de limpadores, tem-se a tensão abaixo (Tpl):

$$Tpl = 0 * (5 * 24) = 0 \text{ lbs} \quad (58)$$

A tensão (Tbc) referente a dois raspadores para a correia de 24”:

$$Tbc = 2 * (5 * 24) = 240 \text{ lbs} \quad (59)$$

Então:

$$Tac = 66.34 + 0 + 240 = 306.34 \text{ lbs} \quad (60)$$

4.2.9 Tensão resultante da aceleração do material com a correia (Tam)

O material sai do alimentador e chega ao transportador com uma aceleração que se origina no alimentador. Esse impacto de aceleração do material na correia é um dos principais fatores de desgaste e rompimento da mesma, mas não é um parâmetro que demanda muita potência por se consistir apenas na força do material caindo sobre o equipamento.

$$Tam = \frac{160 \cdot 2000}{32.2 \cdot 3600} * \frac{88.47 - 0}{60} = 4.07 \text{ lb} = 1.85 \text{ kg} \quad (61)$$

4.2.10 Cálculo de flexão da correia entre os roletes (SAG)

O SAG (y) busca verificar se haverá derramamento de material. Como o valor abaixo foi menor que 3% do espaçamento entre os roletes de carga, pode-se dizer que não haverá derramamento de material.

$$y = \frac{4^2 \cdot (6 + 60.29)}{8 \cdot 1527.42} = 0.086794 \text{ ft} \quad (62)$$

Espaçamento entre roletes de carga: 4 ft

$$0.086794 \leq 3\% \times 4 \quad (63)$$

4.3 Cálculo da potência requerida

A potência consumida pelo transportador é calculada a fim de possibilitar a melhor escolha do motor para o equipamento. Dessa forma são utilizadas a tensão efetiva e velocidade selecionada para a correia transportadora. Para a potência corrigida é utilizada a eficiência do motor que é discutida em seguida:

$$Pot = \frac{1527.42 \cdot 590.55}{33000} = 27.33 \text{ HP ou } 20,38 \text{ kW} \quad (64)$$

4.3.1 Potência corrigida de acordo com a eficiência do motor (93%)

$$Pot_Corrigida = \frac{20,38}{0,93} = 21,91 \text{ kW} \quad (65)$$

4.4 Estudo do motor e redutor aplicado no equipamento

4.4.1 Resumo dos resultados calculados

A Tabela 14 resume e organiza os valores calculados a fim de dar suporte para a discussão nas partes de resultado e conclusão.

Tabela 14 - Variáveis calculadas e parâmetro fixados para o protótipo

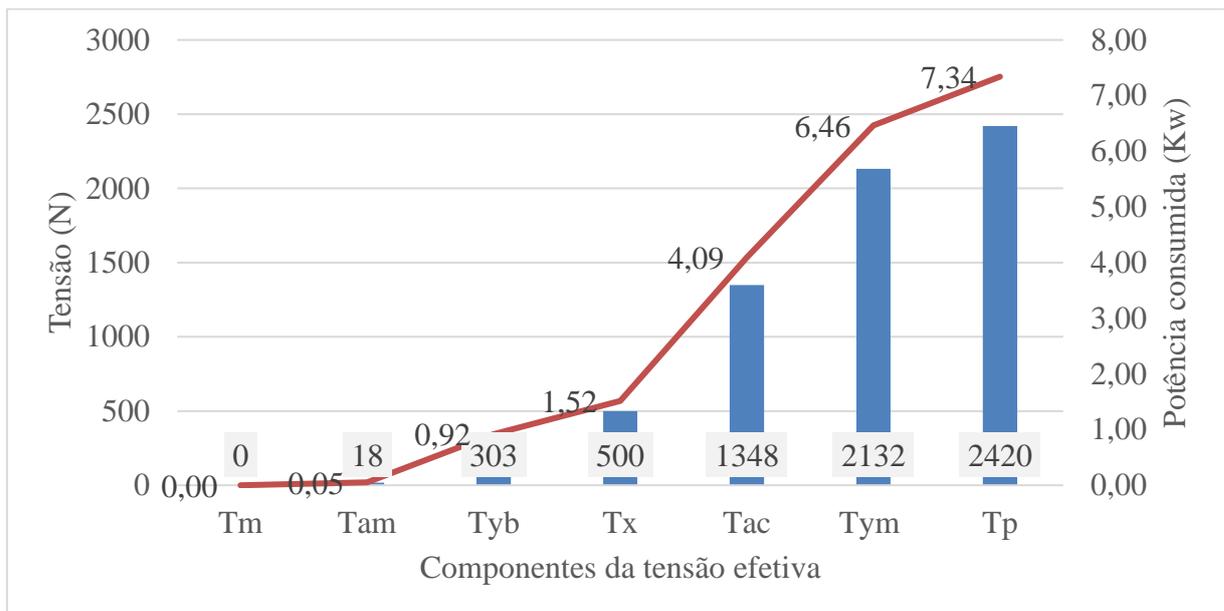
VARIÁVEIS CALCULADAS E PARÂMETROS FIXADOS	
Comprimento da correia	70 metros
Largura da correia	24"
Altura de elevação	1,04 m
Inclinação	0°
Ângulo de acomodação	25°
Regime de trabalho	24h/Dia: 365 dias/Ano
Inclinação dos roletes	35°
Material	Minério de ferro
Capacidade de carga	160ton/h: 97,98 lbs/s
Densidade do minério	150 lb/ft ³
Granulometria máxima do minério	150 mm - 5,9"
Velocidade máxima	600 ft/min - 3,05 m/s
Velocidade mínima	1.47 ft/s - 0,45 m/s
Velocidade selecionada	590.55 ft/min - 3,0 m/s
Fator de ajuste: Roleta (K1)	1,1
Peso da correia	6.0 lbs/ft: 8,94 kg/m
Peso do material	60.29 lbs/ft: 89,72 kg/m
Carga nos rolos de carga	271.25 lbs
Carga nos rolos de retorno	24 lbs
Tensão de atrito entre correia e roletes (Tx)	113.67 lbs
Tensão de resistência à flexão entre correia e roletes (Tyb)	68.88 lbs
Tensão de resistência à flexão do material sobre roletes (Tym)	484.45 lbs
Tensão relativa à elevação do material (Tm)	0 lb
Tensão resultante do dobramento da correia e ao atrito do eixo do tambor com o mancal (Tp)	550 lbs
Tensões devido aos acessórios do transportador (Tac)	306.34 lbs
Tensão entre guia e material (Tsb)	66.34 lbs
Tensão resultante da aceleração do material na alimentação (Tam)	4.07 lbs
Tensão de limpadores (Tpl)	0 lbs
Tensão de raspadores (Tbc)	240 lbs
Potência requerida	27.33 HP : 20,38 kW

Fonte: Do autor (2023)

4.4.2 Estudo do motor utilizado no transportador

A figura 44 exibe o consumo de potência do equipamento em função de cada um dos componentes de tensão calculados durante esse projeto. Com isso, pode ser analisado o impacto de cada item na energia consumida discretizando o gasto energético do equipamento.

Figura 44 - Consumo de potência por elemento de tensão



Fonte: Do autor (2023)

O resultado encontrado para a potência requerida foi validado com o motor utilizado no equipamento da planta estudada, que tem 22 kW (30 cv) de potência e 93% de eficiência. É importante pontuar novamente que em vários pontos os cálculos realizados consideraram situações críticas para a correia transportadora, de forma que o motor selecionado pudesse atender às condições mais complexas de trabalho. Durante essa etapa de resultados serão discutidos todos esses fatores e os motivos para a utilização dos mesmos. Outras informações sobre o motor estão dispostas nas Figura 45 e Figura 46:

Figura 45 - Modelo do motor utilizado no equipamento



A linha W22 atende aos níveis de rendimento especificados na Portaria Interministerial n.º 1, de 29 de junho de 2017, dessa forma, promove redução do consumo de energia, oferece ótima relação custo-benefício e consequentemente maior produtividade e gastos reduzidos para a indústria.

Resumo das características técnicas

Norma	ABNT NBR 17094	Potência	30 cv
Frequência	60 Hz	Fixação	Com pés
Tensão	220/380/440 V	Flange	C
Número de polos	4	Forma construtiva	B34D
Grau de proteção	IPW55	Caixa de ligação*	Posição esquerda
Rotação síncrona	1800 rpm	Refrigeração	IC411 - TFVE

⇄ Comparar

Fonte: Catálogo WEG (2022)

Figura 46 - Especificações do motor utilizado no transportador

W22 IR3 Premium

Potência		Carcaça	Conjugado Nominal (kgfm)	Corrente com Rotor Bloqueado Ip/In	Conjugado de Partida Cp/Cn	Conjugado Máximo Cmáx/Cn	Momento de Inércia J (kgm²)	Tempo máximo com rotor bloqueado (s)		Massa (kg)	Nível médio de pressão sonora dB(A)	Fator de Serviço	RPM	% de Carga						Tensão (V)	Corrente Nominal In (A)
kW	HP							Quente	Frio					Rendimento			Fator de Potência				
														50	75	100	50	75	100		
IV Polos																					
0,12	0,16	63	0,068	4,8	2,8	2,9	0,00049	28	62	8,3	48	1,25	1710	58	64	66	0,46	0,59	0,68	220	0,702
0,18	0,25	63	0,103	5	2,8	2,9	0,0006	39	86	8,5	48	1,25	1700	62	67	69,5	0,49	0,61	0,7	220	0,971
0,25	0,33	63	0,143	5,5	3,3	3,2	0,00066	30	66	8,8	48	1,25	1705	66	71	73,4	0,44	0,56	0,66	220	1,35
0,37	0,5	71	0,212	5,1	2,4	2,7	0,00071	44	97	11,2	47	1,25	1700	75	77,5	78,2	0,49	0,62	0,7	220	1,77
0,55	0,75	71	0,319	5,3	3	3	0,00083	14	31	12,4	47	1,25	1680	73	78	79	0,44	0,56	0,66	220	2,77
0,75	1	80	0,426	7,3	3	3	0,00289	16	35	15,5	48	1,25	1715	82,3	83	83	0,63	0,74	0,82	220	2,89
1,1	1,5	L80	0,621	7,4	3,4	3,4	0,00372	11	24	19	48	1,25	1725	79,5	82,5	84	0,58	0,71	0,8	220	4,3
1,5	2	L90S	0,835	7,7	2,7	3,3	0,00655	14	31	23,1	51	1,25	1750	84	86	86,5	0,59	0,72	0,8	220	5,69
2,2	3	L90L	1,23	7,4	2,8	3,1	0,00765	11	24	26,7	51	1,25	1745	86	86,5	87,5	0,6	0,73	0,8	220	8,25
3	4	L100L	1,67	9,1	4	4	0,00964	15	33	39	54	1,25	1745	87,4	88,5	89,5	0,57	0,69	0,77	440	5,71
3,7	5	L100L	2,07	8,3	4,2	4,2	0,01191	14	31	39,7	54	1,25	1740	87,5	88,5	89,5	0,56	0,69	0,77	440	7,04
4,5	6	112M	2,51	7	2,4	3	0,01798	16	35	45,4	56	1,25	1745	88,7	89,5	89,5	0,61	0,74	0,8	440	8,25
5,5	7,5	L112M	3,06	7,3	2,5	3,2	0,02055	15	33	51,1	56	1,25	1750	89,7	90,3	91	0,58	0,7	0,78	440	10,2
7,5	10	132S	4,14	8,2	2,3	3,5	0,05631	13	29	71,8	58	1,25	1765	90,8	91,6	91,7	0,66	0,78	0,84	440	12,8
9,2	12,5	132M	5,08	8,5	2,4	3,5	0,06382	10	22	80,4	58	1,25	1765	91,8	92,4	92,4	0,66	0,78	0,84	440	15,6
11	15	132M/L	6,09	8,3	2,5	3,5	0,06721	8	18	85,5	58	1,25	1760	90,6	91,5	92,4	0,63	0,76	0,83	440	18,8
15	20	160M	8,23	9	3,2	3,4	0,14707	13	29	138	64	1,25	1775	91,6	93	93	0,64	0,75	0,81	440	26,1
18,5	25	160L	10,2	7,3	3	3,2	0,18125	12	26	158	64	1,25	1772	92,4	93,6	93,6	0,64	0,75	0,81	440	32
22	30	180M	12,1	8	3,4	3,2	0,19185	20	44	178	63	1,25	1770	93	93,5	93,6	0,66	0,76	0,81	440	38,1
30	40	200M	16,4	7	2,8	2,8	0,32017	22	48	241	66	1,25	1778	93,8	94	94,1	0,7	0,79	0,84	440	49,8
37	50	200L	20,3	6,4	2,5	2,7	0,3728	20	44	266	66	1,25	1775	94	94,4	94,5	0,7	0,8	0,84	440	61,2

Fonte: Catálogo WEG (2022)

4.4.3 Estudo do redutor utilizado no transportador

Conhecendo os dados do motor e os parâmetros do processo a que o equipamento está exposto é possível determinar o redutor ideal para aplicação e compará-lo ao que está implantado em campo no transportador cujas características estão apresentadas na Figura 47:

Figura 47 - Especificações do redutor no transportador

	i_{ges}	n_2 $n_1 = 1750 \text{ min}^{-1}$ [min^{-1}]	M_{2max} $f_B = 1$ [Nm]	W			IEC														
				P_{1max} $n_1 = 1750 \text{ min}^{-1}$ [kW]	$n_1 = 1150 \text{ min}^{-1}$ [kW]	$f_B \geq 1$ $n_1 = 875 \text{ min}^{-1}$ [kW]	$f_B \Rightarrow D2 - D42$														
							IEC														
							71	80	90	100	112	132									
SK 9072.1	245,76	7,1	8500	6,34	4,17	3,17						*									
	206,84	8,5	8500	7,53	4,95	3,77						*									
W	186,86	9,4	8500	8,34	5,48	4,17						*	*	*							
+	157,27	11	8500	9,89	6,50	4,95						*	*	*							
IEC	136,88	13	6700	8,99	5,91	4,50						*									
	110,18	16	8500	14,1	9,27	7,05						*									
$\frac{D}{d}$	91,47	19	8500	17,0	11,2	8,52						*									
mm	79,69	22	8500	19,6	12,9	9,82						*									
$\Rightarrow D131$	70,22	25	8500	22,2	14,6	11,1						*						*	*		
	58,44	30	8500	26,7	17,5	13,3						*						*	*		
	50,35	35	8200	29,9	19,6	14,9						*						*	*		
	44,81	39	7700	31,5	20,7	15,7						*						*	*		
	41,11	43	7700	34,4	22,6	17,2						*						*	*		
	35,19	50	8500	44,3	29,1	22,1						*						*	*		
	29,29	60	8500	45,0	29,6	22,5						*						*	*		
	25,24	69	8500	45,0	29,6	22,5						*						*	*		
	22,46	78	8500	45,0	29,6	22,5						*						*	*		
	20,61	85	8500	45,0	29,6	22,5						*						*	*		
	18,29	95	7800	45,0	29,6	22,5						*						*	*		
	16,44	106	7500	45,0	29,6	22,5						*						*	*		
	15,40	113	7500	45,0	29,6	22,5						*						*	*		

Fonte: Catálogo WEG (2022)

Parâmetros do processo e velocidade a ser atendida pelo redutor:

- 5 Motor: 4 polos/1800 RPM
- 6 Velocidade mínima do equipamento: 0,45 m/s
- 7 Diâmetro do tambor de acionamento: $16'' = 0,4064 \text{ m}$

Considerando que:

$$v = \omega * r \quad (66)$$

 ω = Velocidade angular (rpm)

v = Velocidade máxima do equipamento (m/s)

r = Raio (m)

A velocidade angular a ser atendida pela redução será:

$$\omega = \frac{3}{0,2032} * \frac{60}{2*\pi} = 141 \text{ rpm} \quad (67)$$

O valor acima considera a velocidade máxima calculada para o transportador na saída do tambor de acionamento. Para a velocidade mínima, tem-se:

$$\omega = \frac{0,45}{0,2032} * \frac{60}{2*\pi} = 21,15 \text{ rpm} \quad (68)$$

Redutor utilizado:

- SK 9072.1 – 180 LH/4 AR
- Fator de redução do redutor: $i = 35,19$
- Rotação máxima: $n1 = 1800 \text{ rpm}$
- Rotação mínima: $n2 = 50 \text{ rpm}$

Velocidade linear mínima da correia transportadora com o redutor utilizado pela empresa:

$$v = 50 * \frac{2*\pi}{60} \left(\frac{16}{2} * 0,0254 \right) = 1,06 \text{ m/s} \quad (69)$$

A velocidade da correia não atende o intervalo exigido pelo equipamento, que varia de 0,5 m/s a 3,05 m/s. Esse fator compromete para casos em que o transportador pode trabalhar na velocidade mínima para economizar energia. Dessa forma, mesmo com uma vazão muito baixa, o equipamento trabalhará a 1,06 m/s.

Os cálculos condizem em parte com o que se encontra no equipamento, mesmo ocorrendo o fato de o equacionamento ser limitado e não considerar todas as situações a que o transportador estará exposto em campo. Dessa forma, é importante delimitar a margem de segurança com precisão para equilibrar menores custos financeiros com as necessidades do processo.

4.4.4 Análise do torque de acionamento

O torque necessário para movimentar o transportador será:

$$\tau_C = \frac{30 * 21910}{\pi * 50} = 4,18 \text{ kN.m} \quad (70)$$

τ_C = Torque para a correia transportadora

Enquanto isso, o motor fornece:

$$\tau_m = \frac{30 \times 22000}{\pi \times 1770} = 118,69 \text{ N.m} \quad (71)$$

τ_m = Torque na saída do motor

Esse é o valor do torque na entrada do redutor. Dessa forma, precisa-se calcular o torque na saída do redutor a partir do fator de redução disponível pelo mesmo, como é mostrado na equação 72:

$$\tau_r = 118,69 \times 35,19 = 4,18 \text{ kN.m} \quad (72)$$

τ_r = Torque na saída do redutor

Dessa forma, o torque fornecido pelo conjunto moto-redutor é exatamente o demandado pelo equipamento, levando em consideração que as perdas por eficiência já se encontram descontadas na potência utilizado para o cálculo do torque exigido pelo transportador. É importante ressaltar novamente que esse caso considera o equipamento completamente carregado, exposto aos casos mais críticos quanto à alguns fatores dos componentes de tensão. Mesmo nessa situação, pode-se dizer que o resultado foi satisfatório.

4.5 Estudos da relação entre potência e os parâmetros de operação

Vários cenários podem ser analisados quando os parâmetros de operação e de projeto são alterados. Essa etapa é importante ao estudar a viabilidade para implementação do equipamento, pois permite que a operação seja atendida da melhor forma possível, sendo eficiente quanto aos gastos com implementação, manutenção e desempenho.

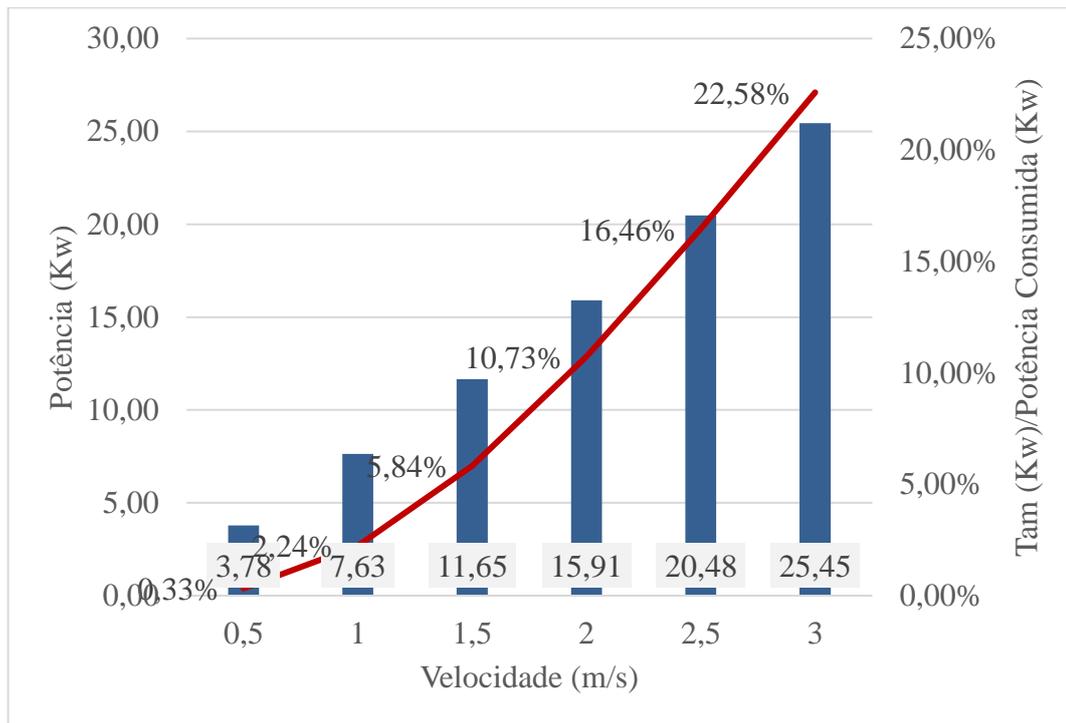
Nas próximas seções será analisada, principalmente, a relação entre potência consumida e os principais componentes de consumo de energia, como: velocidade, comprimento do transportador, características do material, inclinação do equipamento e largura da correia.

4.5.1 Impacto da velocidade na potência

É possível notar na formulação apresentada na metodologia que a potência requerida varia proporcionalmente à velocidade escolhida para o transportador. O principal componente da tensão efetiva que impacta na relação “Velocidade x Potência” é a Tensão resultante do impacto do material no momento da alimentação da correia (Tam), pois quanto maior a velocidade do transportador em relação a velocidade de alimentação do material, mais é exigido do equipamento, resultando no aumento de consumo do mesmo.

A variação de velocidade da correia transportadora também é proporcional à vazão resultante no equipamento, outro fator presente na tensão de aceleração do material como um elemento de gasto energético. A figura 48 resume o que foi dito em relação ao desenvolvimento de “Velocidade x Potência consumida”, além da contribuição da “Tam” para essa relação. Para que esse gráfico fosse realizado, todos os cálculos de dimensionamento do transportador foram refeitas com seis velocidades diferentes, no intervalo de 0,5 m/s a 3 m/s, acarretando nas potências equivalentes. É importante observar que, quanto maior a velocidade da correia, maior o impacto da tensão de aceleração do material no consumo energético, mostrando que nessa situação o componente cresce mais rápido que os outros.

Figura 48 - Relação velocidade média x Potência requerida

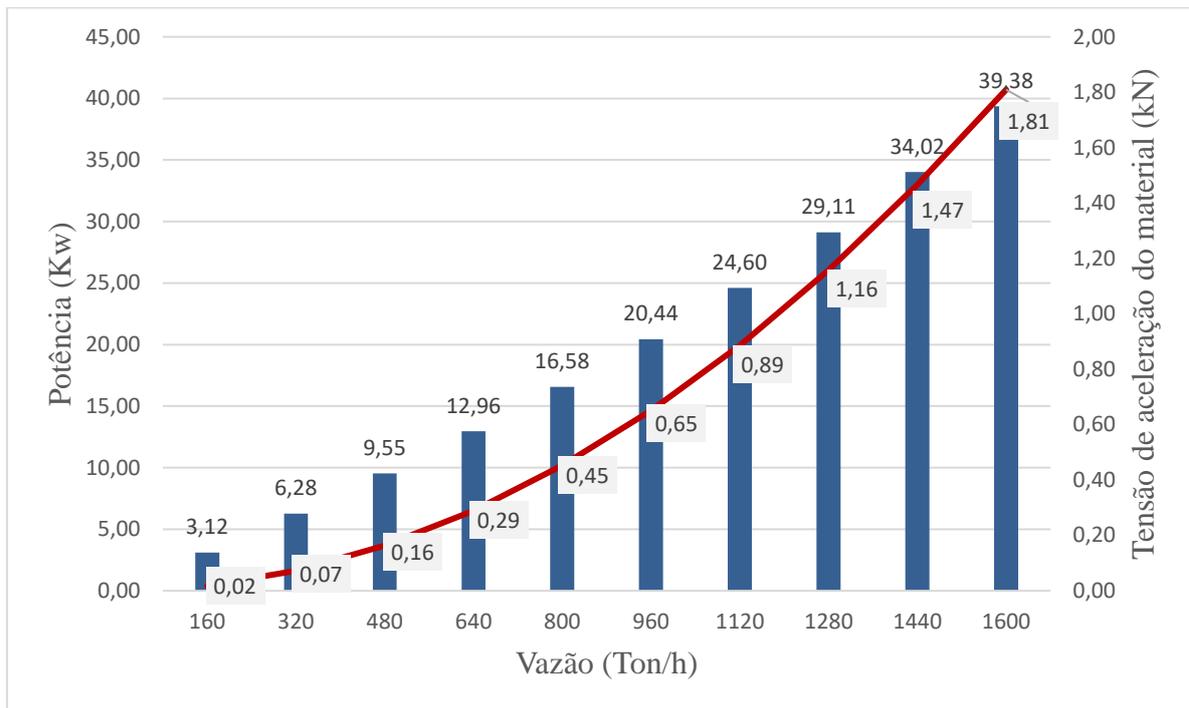


Fonte: Do autor (2023)

4.5.2 Influência da vazão na potência

Como o processo produtivo não é constante na mineração, em muitas situações o equipamento precisa de adequação para atender à variação da vazão. Em casos como esse é mais comum alterar a velocidade da correia para atingir os parâmetros necessários, o que resultará no mesmo comportamento relatado acima, onde a variação da vazão vai ser proporcional à velocidade e ao consumo de energia. Também como no caso anterior, o único componente da tensão efetiva afetado por essa alteração é a Tensão de aceleração do material, como pode ser visto na Figura 49. No gráfico em questão as vazões foram alteradas na formulação discutida na metodologia, o que altera a velocidade do transportador, como pode ser visto no próprio equacionamento. Com isso, são alterados os mesmos fatores citados no caso acima para a Figura 48.

Figura 49 -Relação do consumo de potência com a vazão do transportador



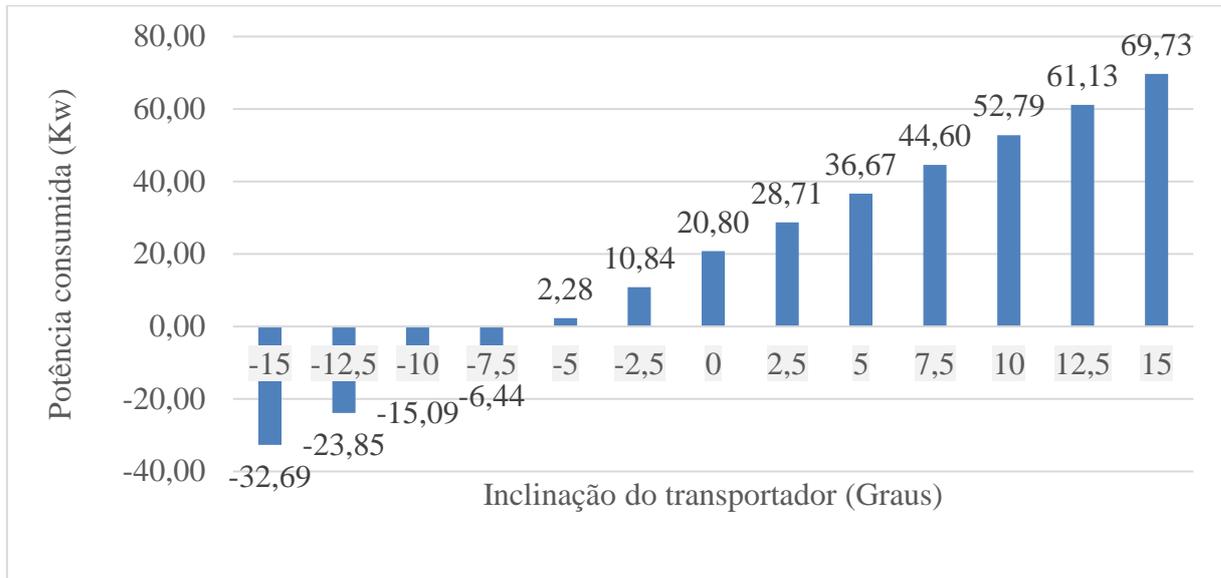
Fonte: Do autor (2023)

As figuras 48 e 49 elucidam a relação direta entre velocidade e vazão, o que também é presenciado no próprio equacionamento que demonstra o quanto esses dois fatores se inter-relacionam, justificando o fato de impactarem o mesmo componente da tensão efetiva calculada. Além disso, é importante ter atenção à influência desses elementos no desgaste das peças e dispositivos do transportador, que afeta os custos de manutenção do equipamento.

4.5.3 Efeito da inclinação do transportador na potência

O planejamento de uma planta de beneficiamento de minério precisa considerar os desníveis do terreno, pois normalmente ficam em terrenos declivosos. Essa característica torna mais importante a análise de inclinação do transportador, possibilitando atender a logística de transporte do material pela planta e a busca por eficiência em custos de operação e manutenção. A figura 50 ilustra a relação entre inclinação e consumo de potência para o caso trabalhado nesse projeto. Para a construção desse gráfico foram utilizadas treze inclinações, onde todo o equacionamento foi realizado para cada uma, alterando principalmente as tensões que serão tratadas abaixo.

Figura 50 - Relação do consumo de potência com a inclinação do equipamento



Fonte: Do autor (2023)

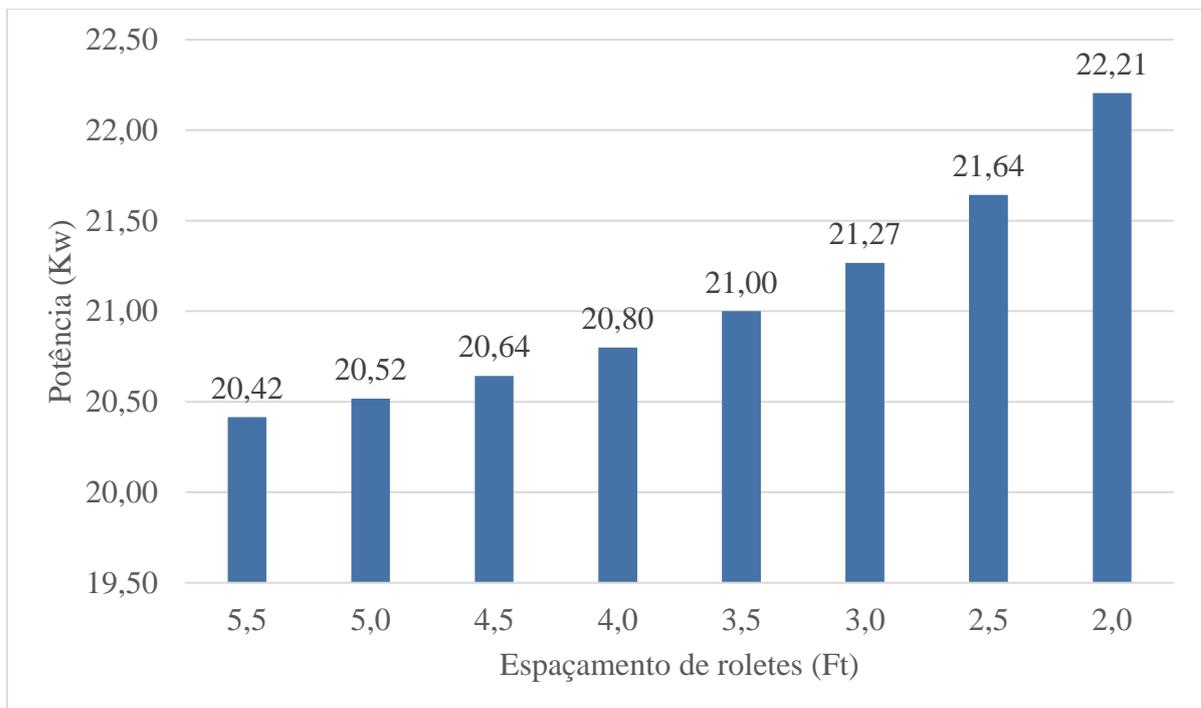
Vários pontos podem ser discutidos no gráfico acima. O primeiro seria o aumento de consumo que é proporcional à inclinação, justificando haver mais trabalho do motor para elevar o material que apresenta a força peso contrária ao deslocamento. O que muda bastante quando a angulação do equipamento é negativa (Declive) onde, nesse caso, a força peso está favorecendo a movimentação da esteira, explicando os dados negativos de potência apontados no gráfico. Pode-se dizer que o sistema está “gerando” energia até o ângulo de $-5,63^\circ$, quando o consumo passa a ser positivo. Isso acontece, porque a partir dessa angulação a força exercida pela alimentação do material é o suficiente para manter o equipamento em atividade. Energia que pode ser recuperada.

Os principais componentes da tensão efetiva afetados pela inclinação da correia transportadora são a Tensão devido à flexão da correia sobre os roletes, Tensão na correia devido à flexão causada pelo material conforme a mesma se move sobre os roletes e Tensão de elevação do material, que é a mais impactada pela variação de inclinação do equipamento conforme explicado no parágrafo anterior.

4.5.4 Relação entre potência e espaçamento dos roletes

Os roletes são classificados em relação às condições de operação e características do equipamento, mas é comum a escolha ser menos flexível, principalmente, quanto ao parâmetro “Espaçamento” que é tabelado e fixo de acordo com a largura da correia e peso específico do material carregado. A figura 51 mostra a relação “Espaçamento x Consumo de potência”. Nesse caso, o equacionamento foi feito para todos os valores de espaçamento tabelados em CEMA, modificando o fator “Kx” e a Tensão resultante do atrito da correia com os roletes.

Figura 51 - Relação de gasto energético com a variação de espaçamento dos roletes



Fonte: Do autor (2023)

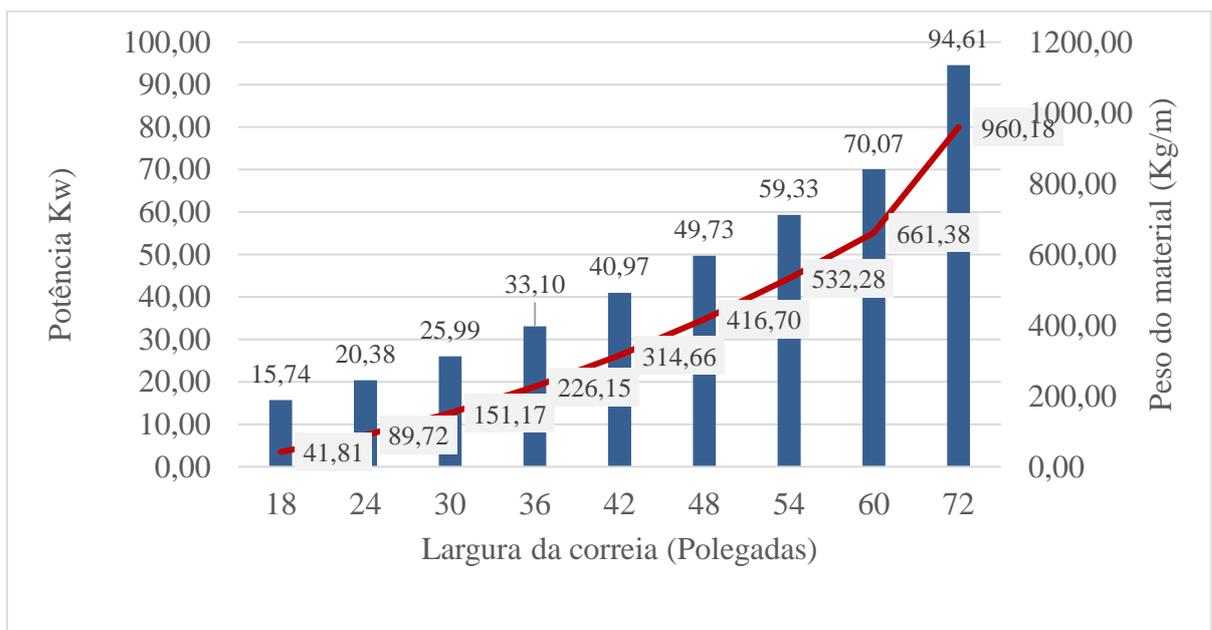
O intervalo escolhido para o “Espaçamento” no gráfico foi baseado na tabela da norma CEMA e fica claro o aumento de consumo inversamente proporcional ao aumento do espaçamento. Nessa situação, o único elemento interferido por essa variação é a Tensão resultante do atrito da correia com os roletes, pois quanto menor o espaçamento mais roletes haverá no equipamento, resultando no crescimento do fator atrito e, conseqüentemente, no aumento do consumo de energia.

Aumentar o número de roletes possibilita dividir a carga entre mais componentes, desgastando menos cada um. No entanto, o número de rolos para trocar também cresce, relação que é mais viável analisar em campo, observando que o gasto energético pode ser considerado irrelevante quanto aos custos que os próprios roletes podem ter.

4.5.5 Consequência da largura da correia na potência

Um dos principais fatores que podem ser alterados no equipamento para atender um processo é a largura da correia. Isso permitiria o aumento do volume de material transportado para atender maiores demandas. No entanto, esse parâmetro é um dos principais consumidores de potência do motor devido à influência na quantidade de material sobre a correia, fator que impacta intensamente no gasto de energia, como pode ser visto na própria formulação durante o trabalho. Figura 52 apresenta essas relações citadas e como elas estão associadas. Ele foi criado refazendo todas as equações trabalhadas na metodologia, porque todas elas dependem da influência da largura da correia sobre o peso do material.

Figura 52 - Relação da largura da correia com a potência consumida e peso do material “Wm” sobre a mesma



Fonte: Do autor (2023)

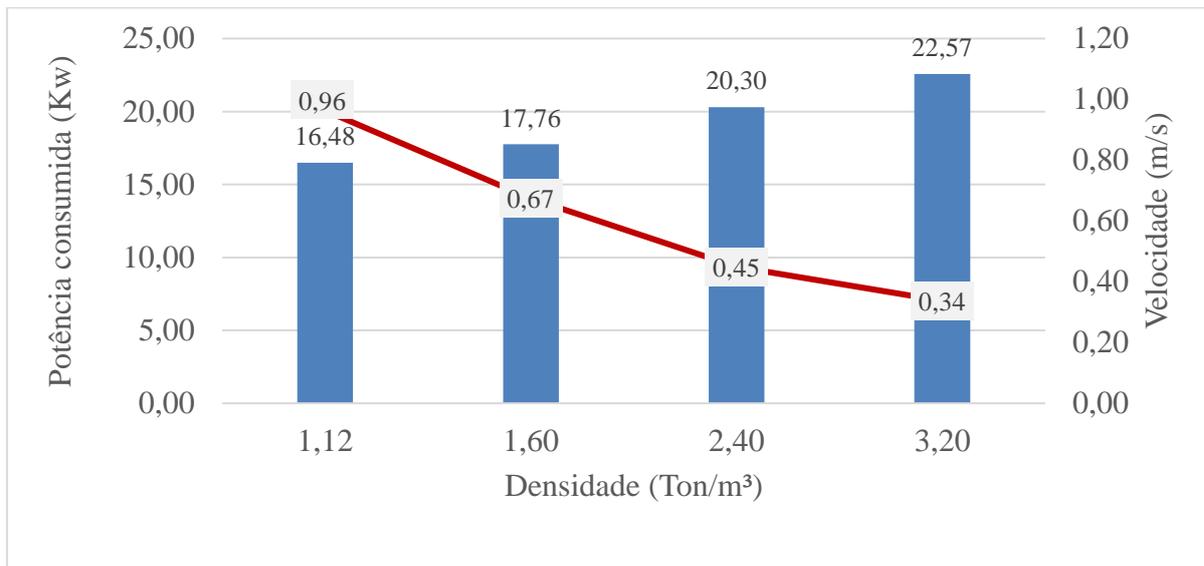
O aumento da largura da correia permite acomodar mais material sobre a mesma o que aumenta o peso do material “ W_m ” sobre o equipamento, demandando mais do motor e dos componentes do próprio transportador. Esse ponto precisa ser analisado, pois a classe e o diâmetro dos roletes podem mudar de acordo com a largura da correia assim como os componentes auxiliares, contrapeso e tambores de acionamento e retorno.

4.5.6 Impacto das características do material na potência

Durante o processo produtivo, os transportadores fazem parte de etapas distintas do beneficiamento de minério. Isso traz particularidades para cada equipamento, resultado das diferentes condições de serviço. Uma dessas especificidades são os diversos tipos de materiais que passam por cada correia. No início do processo são transportados solos e rochas que saem dos britadores primários. Durante o circuito seco de beneficiamento, a granulometria do material vai diminuindo até passar por um circuito úmido que permite chegar no produto final. Nesse ponto, o equipamento estará exposto mais especificamente a minério que pode ter granulometria fina ou grossa a depender do objetivo da empresa. Ainda deve ser considerado o período de chuva em caso de plantas a céu aberto, pois o material úmido também interfere no consumo do motor.

Todas essas situações tornam mais importante considerar o tipo de material a ser transportado, as condições de operação e de qual etapa do processo o equipamento faz parte. A figura 53 apresenta a relação entre potência consumida e densidade do material. Essa última foi escolhida como parâmetro para representar o máximo de situações possíveis a que os equipamentos de transporte estão expostos, considerando as diferentes características que os materiais podem apresentar. Como esse fator afeta o peso do material sobre a correia transportadora, para gerar esse gráfico, todo o equacionamento precisou ser feito para cada elemento de densidade diferente,

Figura 53 - Relação entre densidade, potência consumida e velocidade mínima do equipamento



Fonte: Do autor (2023)

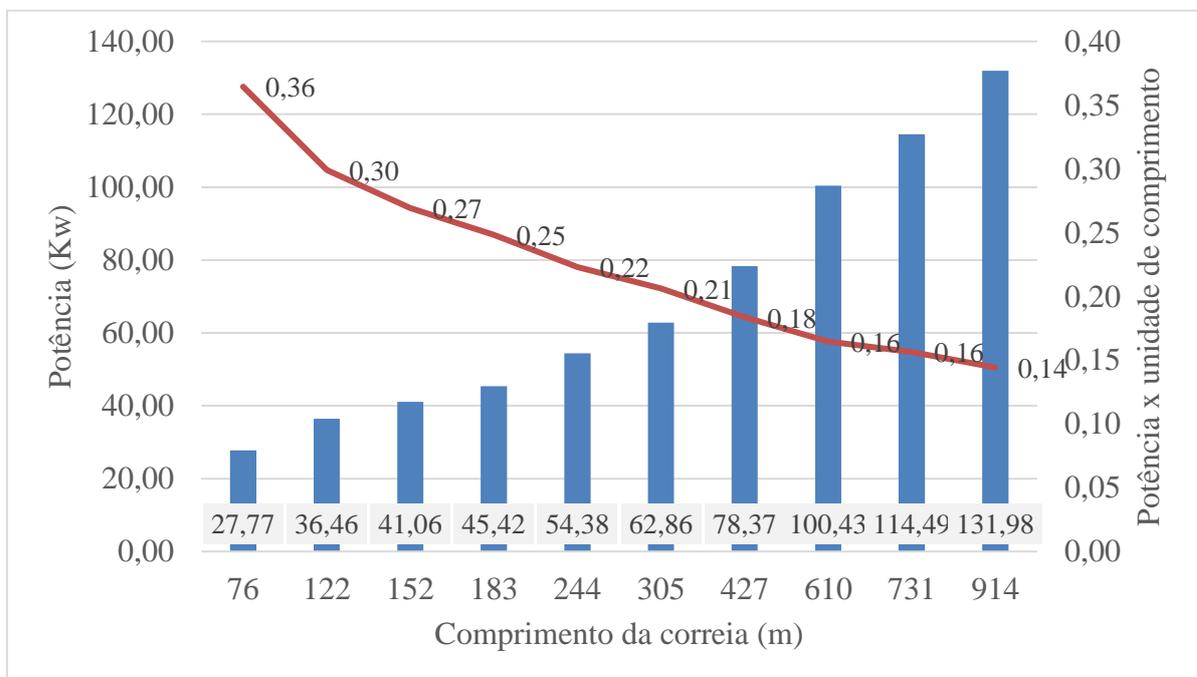
Como a vazão é considerada constante para as situações acima, o resultado é a redução da velocidade mínima do transportador com o aumento da densidade do material, pois o tempo de alimentação será acrescido para carregar mais material ao equipamento. A potência consumida se relaciona com a densidade pelo mesmo fator que foi dito para o Gráfico 6 (Variação da largura da correia), porque influencia na carga carregada pelo equipamento que eleva com o peso do material “ W_m ”, um dos principais componentes que impactam a tensão efetiva.

4.5.7 Implicação entre o comprimento do transportador e a potência

Em uma planta de beneficiamento de minério dispõe de correias transportadoras com diferentes comprimentos que variam de acordo com a distância em que o material precisa ser transportado. Para simular essas situações a tensão efetiva foi recalculada com diferentes comprimentos para o equipamento. A variação do comprimento do equipamento acontece na formulação de: Tensão devido ao atrito entre a correia e os roletes (T_x), Tensão devido a resistência à flexão da correia em contato com os roletes (T_{yb}) e Tensão devido a resistência à flexão do material transportado conforme se move pelos roletes (T_{ym}). Dessa forma, para obter os resultados citados abaixo, “ T_x ”, “ T_{yb} ” e “ T_{ym} ” precisaram ser adequadas para cada valor de comprimento utilizado.

Na figura 54 é possível visualizar que o consumo de energia aumenta com o comprimento do equipamento, principalmente pelo atrito e flexão da correia com os roletes e pela flexão resultante do material sobre a mesma. No entanto, nesse caso a vazão continua a mesma e a velocidade selecionada é de 3 m/s, próxima ao limite máximo, assim como o indicado para projeto. Um outro ponto importante é que a potência consumida por metro diminui de acordo em que o comprimento aumenta, abrindo brecha para discussão sobre a utilização ou não de um equipamento grande para realizar o trabalho de dois transportadores menores, se possível.

Figura 54 - Relação entre potência e comprimento do transportador



Fonte: Do autor (2023)

4.5.8 Variação da potência em função da vazão e inclinação do transportador

A Tabela 15 contém 130 dados calculados que possibilitam observar como a potência consumida se comporta com a variação da vazão e inclinação paralelamente. Com o auxílio de uma planilha eletrônica todos os cálculos apresentados na metodologia foram realizados por 130 vezes e como saída o resultado foi o desempenho do equipamento de acordo com o Gráfico 8:

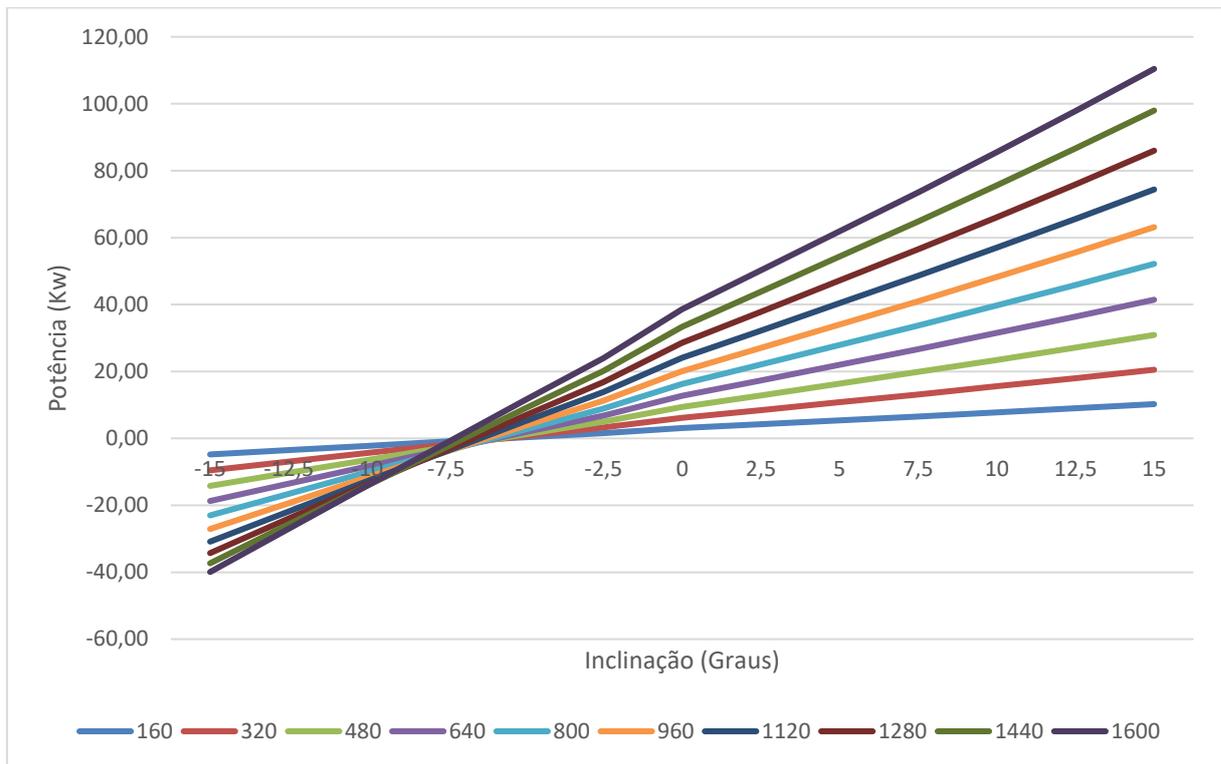
Tabela 15 - Relação entre inclinação e vazão com o consumo de potência (kW)

	INCLINAÇÃO (Graus)												
	-15	-12,5	-10	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15
160	-4,80	-3,50	-2,21	-0,95	0,33	1,59	3,05	4,21	5,38	6,55	7,75	8,97	10,24
320	-9,55	-6,95	-4,38	-1,84	0,72	3,23	6,16	8,48	10,81	13,14	15,55	18,00	20,52
480	-14,20	-10,31	-6,45	-2,64	1,20	4,97	9,36	12,84	16,34	19,84	23,45	27,12	30,91
640	-18,71	-13,51	-8,37	-3,29	1,83	6,85	12,70	17,35	22,02	26,68	31,49	36,39	41,43
800	-23,02	-16,53	-10,10	-3,75	2,65	8,93	16,24	22,05	27,89	33,71	39,73	45,85	52,16
960	-27,08	-19,30	-11,58	-3,96	3,72	11,26	20,03	27,00	34,01	40,99	48,21	55,56	63,13
1120	-30,86	-21,77	-12,77	-3,88	5,08	13,88	24,11	32,24	40,42	48,57	56,98	65,56	74,39
1280	-34,29	-23,91	-13,62	-3,46	6,78	16,83	28,53	37,82	47,17	56,48	66,10	75,90	85,99
1440	-37,33	-25,65	-14,07	-2,65	8,87	20,18	33,34	43,79	54,31	64,78	75,61	86,63	97,99
1600	-39,93	-26,95	-14,09	-1,40	11,40	23,97	38,59	50,20	61,89	73,53	85,56	97,80	110,42

Fonte: Do autor (2023)

A Figura 55 liga os gráficos de vazão e de inclinação que foram apresentados anteriormente. Assim, fica visível o crescimento do consumo de energia com o aumento da vazão e da inclinação. Essa relação permite entender melhor o comportamento do transportador considerando duas variáveis muito relevantes. É interessante notar que a potência utilizada é próxima a zero em torno de 7,5° e que nessa faixa de inclinação todas as vazões são atendidas, ficando a cargo do estudo de viabilidade se prender nos custos com materiais e manutenção. É passível de avaliação também que vazões menores tem menor variação de gasto energético com o aumento da inclinação, quanto maior a vazão maior é o crescimento do consumo de potência como resultado do aumento da inclinação.

Figura 55 - Impacto da vazão (Ton/h) e inclinação na potência consumida



Fonte: Do autor (2023)

4.5.9 Variação da potência em função da velocidade e largura da correia

Dois outros fatores relevantes para o projeto de uma correia transportadora são a velocidade de operação e a largura da mesma. Esses elementos impactam diretamente na vazão disponível e no peso suportado pelo equipamento. A Tabela 16 mostra a relação de todos esses parâmetros com 54 dados calculados, também utilizando a planilha eletrônica para refazer todas as contas para cada combinação de fatores presente na Tabela 16, de forma a esclarecer a conexão entre eles.

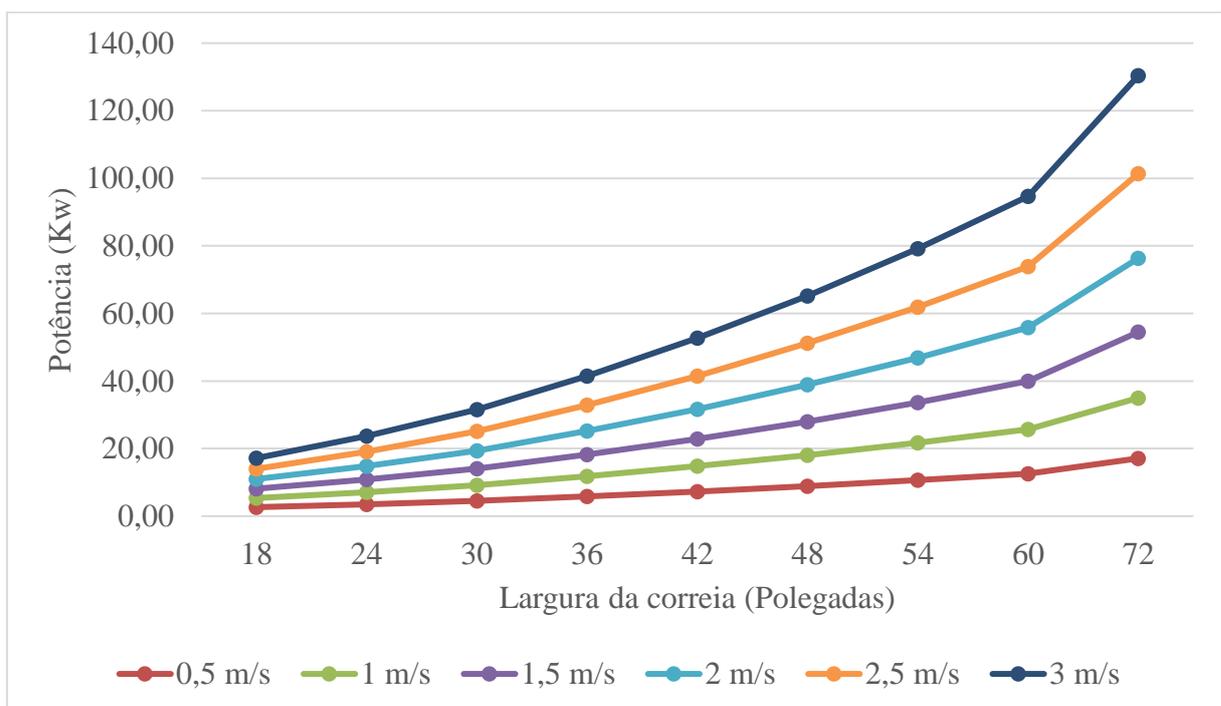
Tabela 26 - Relação entre largura da correia e velocidade com o consumo de potência (kW)

		LARGURA DA CORREIA (Polegadas)								
		18	24	30	36	42	48	54	60	72
Velocidade (m/s)	0,5	2,66	3,51	4,54	5,83	7,26	8,87	10,63	12,60	17,10
	1	5,36	7,10	9,20	11,84	14,79	18,07	21,69	25,74	35,00
	1,5	8,12	10,83	14,11	18,23	22,83	27,97	33,64	39,98	54,48
	2	10,99	14,79	19,39	25,18	31,65	38,90	46,90	55,85	76,34
	2,5	14,00	19,05	25,18	32,87	41,51	51,21	61,92	73,91	101,37
	3	17,18	23,67	31,58	41,50	52,68	65,24	79,14	94,70	130,37

Fonte: Do autor (2023)

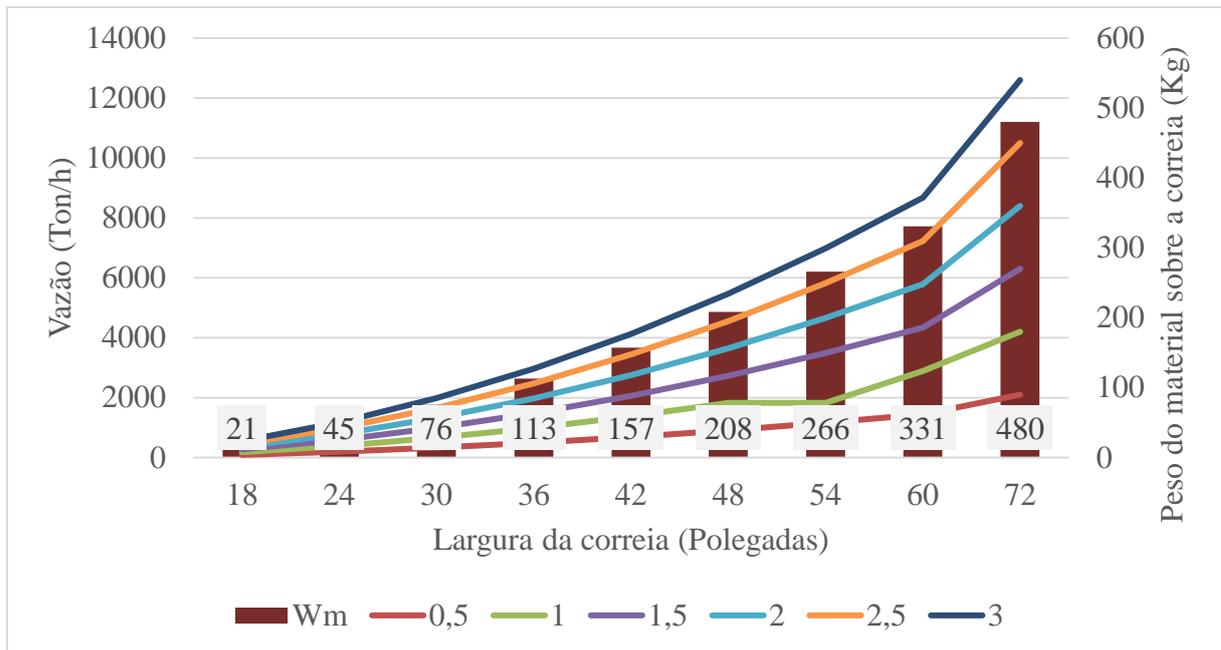
A figura 56 demonstra que a correia transportadora de 18 polegadas apresenta consumo de potência mais aproximado para as velocidades utilizadas. No entanto, quanto mais aumenta a largura da correia maior é a diferença do gasto energético entre as velocidades trabalhadas. Esses cenários se justificam, porque correias mais largas comportam mais material, o que aumenta o peso a que o equipamento está exposto. O aumento de velocidade possibilita maior vazão o que também demanda de mais potência e o crescimento dos dois parâmetros tratados resulta no que é mostrado na figura 57.

Figura 56 - Impacto entre velocidade e largura da correia na potência consumida



Fonte: Do autor (2023)

Figura 57 - Impacto da vazão e largura da correia na potência consumida



Fonte: Do autor (2023)

4.5.10 Variação da potência em função da densidade e largura da correia

Como dito anteriormente, as características dos materiais trabalhados influenciam muito no consumo do equipamento e em empresas de mineração, em cada processo são transportados materiais com características diferentes, fatores que junto à variação da largura da correia, correspondem em grande parte da potência demandada. A Tabela 17 foi realizada refazendo todo o equacionamento visto na metodologia com diferentes valores de densidade do material transportado ao mesmo tempo em que a variação de largura da correia exigiu refazer as contas de tensões relacionadas à vazão.

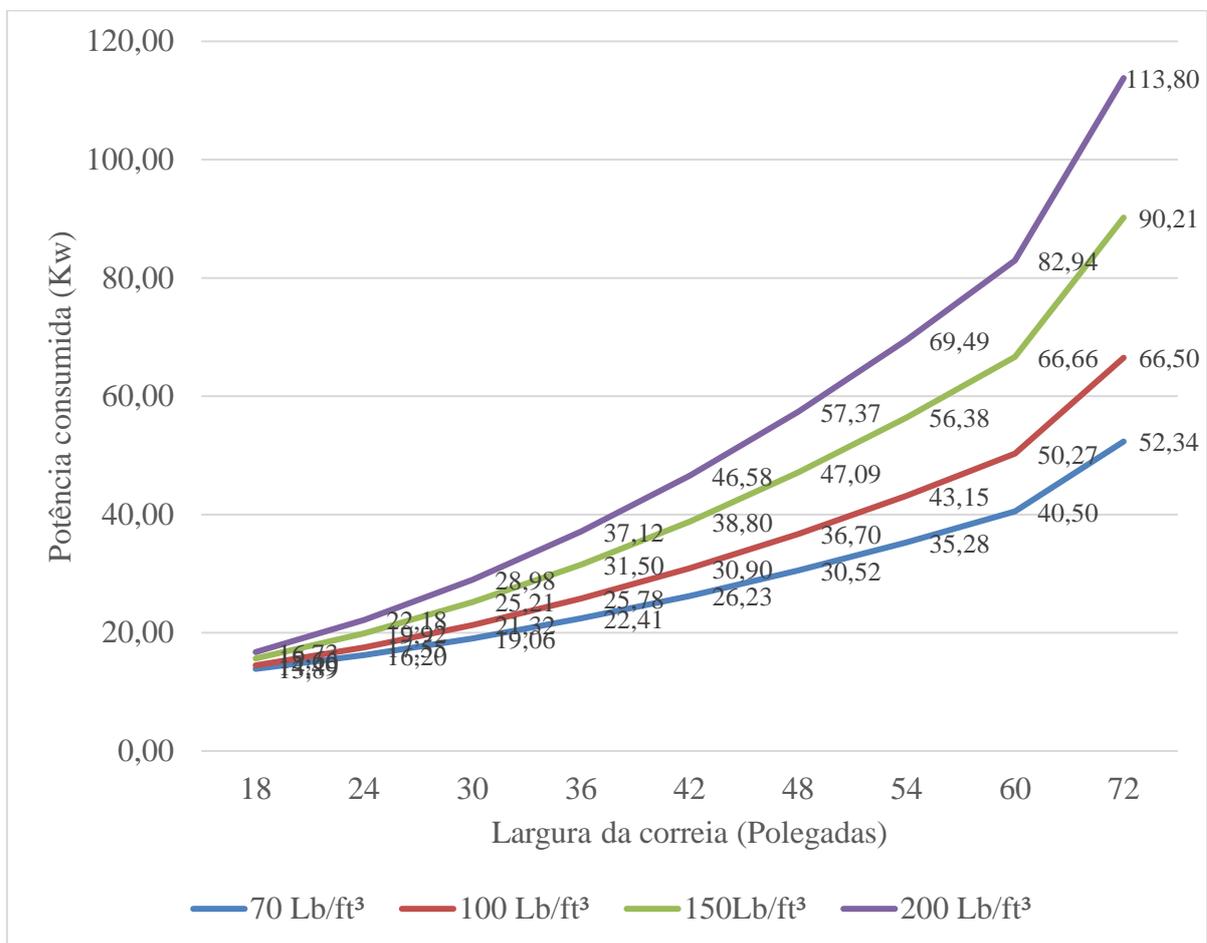
Tabela 17 - Relação entre densidade do material transportado e largura da correia com o consumo de potência (kW)

		LARGURA DA CORREIA (Polegadas)									
		18	24	30	36	42	48	54	60	72	
Densidade (Kg/m ³)	4,37	13,89	16,20	19,06	22,41	26,23	30,52	35,28	40,50	52,34	
	6,24	14,49	17,55	21,32	25,78	30,90	36,70	43,15	50,27	66,50	
	9,36	15,66	19,92	25,21	31,50	38,80	47,09	56,38	66,66	90,21	
	12,49	16,73	22,18	28,98	37,12	46,58	57,37	69,49	82,94	113,80	

Fonte: Do autor (2023)

A figura 58 mostra que o aumento da densidade do material e largura da correia estão relacionados com o maior esforço do equipamento pelo fato de o mesmo ter que suportar o acréscimo de peso do material. O que atenua o gasto energético é o fato de a velocidade da correia diminuir para atender uma vazão constante. Isso, porque quanto mais larga a correia, mais material ela consegue carregar, influenciando diretamente na velocidade exigida, fator que foi explanado com mais detalhes na seção que trata da relação entre velocidade e potência consumida.

Figura 58 - Impacto da densidade do material transportado e largura da correia na potência consumida



Fonte: Do autor (2023)

5 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram o quanto o método CEMA está alinhado com a correia transportadora analisada, pois os cálculos realizados com o método foram condizentes com os parâmetros encontrados no equipamento aplicado na empresa de mineração. No equacionamento foi considerada uma margem de segurança alta onde alguns dados representavam uma situação mais crítica que o caso estudado e mesmo com essas ponderações foi possível chegar a uma resposta coerente.

Os estudos realizados com os principais parâmetros de operação e de projeto proporcionaram avaliar o consumo do transportador quando exposto à diferentes situações e características, onde parâmetros como velocidade ou comprimento da correia foram modificados para possibilitar tabelar a variação de potência a fim de demonstrar o comportamento do equipamento em diferentes cenários. Dessa forma, os dados calculados atendem aos objetivos estipulados ao servir de suporte para projetos como o apresentado nesse trabalho.

Foi mostrado o quanto três tensões são responsáveis pela maior parte do consumo da correia transportadora, são elas: tensão resultante do dobramento da correia e ao atrito do eixo do tambor com o mancal (T_p), tensão de resistência à flexão do material sobre roletes (T_{ym}) e a Tensões devido aos acessórios do transportador (T_{ac}). Essas tensões são responsáveis por mais de 85% do gasto energético total do equipamento. O fato de não haver limpadores colabora para evitar um consumo ainda maior, por se tratar de outro fator que contribui relevantemente para os custos com potência, assim como ocorre com a tensão relativa aos raspadores (T_{bc}). Outro ponto importante é o impacto da inclinação que zerou a potência necessária para elevar o material, o que seria bem diferente caso o transportador fosse inclinado. O peso e as características do minério de ferro granulado impactaram fortemente quase todas as tensões, algo que proporciona possibilidades de estudos aprofundados referentes ao impacto desse fator nos resultados discutidos.

As tensões de atrito (T_x) e de resistência à flexão (T_{yb}) entre correia, assim como a tensão de atrito entre guia e material (T_{ac}) exigem menos do motor, mas o consumo delas não é irrelevante podendo ser criada metodologias que ataquem esses parâmetros para melhorar a eficiência do transportador, principalmente ao ser levado em conta que o equipamento atua 24 horas por dia, aumentando os desgastes dos componentes.

É de extrema importância ter ciência de que, nas seções onde os parâmetros foram modificados para análise de consumo, nem todos os cenários atendem totalmente ao CEMA,

pois isso foi considerado apenas na primeira parte desse trabalho onde os cálculos foram comparados com o equipamento da planta.

REFERÊNCIAS

ANDRE-JIOVÁ, M.; GRINČOVÁ, A. The experimental research of the conveyor belts damage used in mining industry. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Acta Montanistica Slovaca, v. 21, ed. 3, p. 180-190, 1 jan. 2016.

ANDRADE, M.T.M; FARIA, R.S.C. **Manutenção corretiva para desalinhamento de correia em transportador de correia**. 2004. 57 f. Projeto de Graduação - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6678: **Transportadores contínuos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BLAZEJ, R.; JURDZIAK, L. Condition-Based Conveyor Belt Replacement Strategy in Lignite Mines with Random Belt Deterioration. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], p. 1-14, 28 jan. 2020.

CASADO, A.S.; CARRASCO, O.H. **Avances tecnológicos en la concentración de minerales**. Revista Metalúrgica, n. 34, p. 18-27, 2013.

CARNIZELLO, D. C. **Transportador de correia: componentes e cálculos básicos para seu dimensionamento**. Universidade Estadual Paulista, 2011. Trabalho de conclusão de curso, 64p.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2. ed. São Paulo: Signus, 2002. 232 p. v. 1. ISBN 85-7227-141-4.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2. ed. São Paulo: Signus, 2003. 234 p. v. 3. ISBN 85-7227-141-4.

DONSKOI, E; SUTHERS, S; RAYNLYN, T. Modelling and optimization of hydrocyclone for iron ore fines beneficiation — using optical image analysis and iron ore texture classification. **Iron Ore**, International Journal Mineral Processing, p. 106–119, 29 fev. 2008.

ENGENDRAR. **Catálogo técnico**. 1 ed. Campinas: Engendrar, 2014.

ENGENDRAR. **Catálogo técnico**. 1 ed. Campinas: Engendrar, 2022.

FABRÍCA DE AÇO PAULISTA S.A. **Manual de transportadores de correias**. 4 ed. São Paulo: Faço, 1981.

FERRAZ, P. D. **Estudo de confiabilidade e melhoria de transportadores de correia de calcário em uma fábrica de cimento**. Universidade de Brasília, 2019. Trabalho de conclusão de curso, 142 p.

FLEXCO. **Produtos para transportadores de correia**. 1 ed. Santiago: Flexco, 2020.

GELAI, M. A. **Cálculo dinâmico de transportadores de correia: uma análise comparativa ao cálculo estático corroborada por medições de campo**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. Dissertação de mestrado, 150 p.

GERMANI, D. J. **A mineração no Brasil**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: CTMineral, 2002. 60 p.

GOMIDE, R. **Operações unitárias: operações com sistemas sólidos granulares**. Edição do autor. São Paulo, 1983.

HONUS, S.; BOCKO, P.; BOUDA, T.; RISTOVIĆ, I.; VULIĆ, M. The effect of the number of conveyor belt carrying idlers on the failure of an impact placenalysis and iron ore texture classification: A failure analysis. **Engineering Failure Analysis**, [s. l.], 27 fev. 2017.

ITO, M. **Análise de esforços em correias na região do turnover**. Universidade de São Paulo, 2011. Trabalho de conclusão de curso, 159 p.

LOPES, J. C.; DINIZ, C. A.; CONCEIÇÃO, C. D. Estudo dos ciclos operacionais que influenciam a qualidade do desmonte de rocha de mina subterrânea. **Brazilian Journal of Development**, Minas Gerais, ano 2021, v. 7, p. 52032-52047, 19 maio 2021. DOI 10.34117/bjdv7n5-548. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD>. Acesso em: 12 mar. 2022.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. 946 p.

LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2018. 958 p.

MACHADO, I. F.; FIGUEIRÔA, S. F. M. **500 years of mining in Brazil: a brief review.** Resources Policy, [S. l.], v. 27, p. 9-24, 18 mar. 2001.

METAMEC. **Equipamento para mineração.** 1 ed. Jaraguá do Sul: Metamec, 2014.

METSO. **Britador cônico linha HP.** 1 ed. Sorocaba: Metso Brasil, 2008.

METSO. **Alimentadores.** 1 ed. Sorocaba: Metso, 2014.

METSO. **Low Intensity Magnetic Separators (LIMS).** 1 ed. Helsinki: Metso, 2022.

MOINO, C. C. **Determinação da potência consumida em unidade piloto de correia transportadora, em função da velocidade e do ângulo de inclinação.** Universidade Santa Cecília, 2018. Dissertação de mestrado, 82 p.

MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; STEHLÍKOVÁ, B.; TOMAŠKOVÁ, M.; HULÍNOVÁ, Z. Analysis of asymmetrical effect of tension forces in conveyor belt on the idler roll contact forces in the idler housing. **Measurement**, [s. l.], p. 22-32, 4 mar. 2014.

MOLNÁR, V.; FEDORKO, G.; STEHLÍKOVÁ, B.; TOMAŠKOVÁ, M.; HULÍNOVÁ, Z. **Analysis of asymmetrical effect of tension forces in conveyor belt on the idler roll contact forces in the idler housing.** **Measurement**. n. 52, p. 22-32, 2014.

PEREIRA, E.C.B.R.A. **Mapeamento de zonas de desgaste em hidrociclones na classificação de polpa de minério.** 2007. 54 f. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

PFEIFFER. **Getting it done.** 1 ed. São Paulo: Pfeiffer, 2022.

PROCEL INDÚSTRIA. **Correias transportadoras: guia básico.** 1 ed. Brasília: Eletrobrás/Procel, 2009.

REIS, W. S. **Análise de prevenção de perdas aplicada a um transportador de correia utilizado na mineração de ferrosos.** Universidade Federal do Sul de Sudeste do Pará, 2019. Trabalho de conclusão de curso, 65 p.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C.; BRAGA, P. F. **Tratamento de minérios: Práticas laborais.** Rio de Janeiro: CETEM, 2007. 570 p. ISBN 978-85-61121-02-0.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; LIMA, F. F. **Usinas de beneficiamento de minério do Brasil. Minas Gerais: CETEM / MCT, 2001. 398 p. ISBN 85-7227-141-4.**

SANTO, D. A.; MALAGONI, R. A. Projeto de correias transportadoras: um estudo computacional de comparação dos métodos CEMA e prático. **Holos**, 2010, v.3, ed especial, p. 358-369.

SANTOS, E.S. **Avaliação da influência dos britadores de mandíbula e de impacto nas propriedades de agregados reciclados para aplicação em bases e sub-bases de pavimentos.** 2016. 130 F. Mestrado – Universidade Federal do Paraná, 2016.

SILVA, G.M. **Análise dos métodos Prático e CEMA para correias transportadoras e escolha do seu conjunto de acionamento sob a luz da eficiência energética.** Universidade Federal de Uberlândia, 2020. Trabalho de conclusão de curso, 57p.

SOUZA, I. **Concentração mineral.** 1 ed. Fortaleza: Governo do Estado do Ceará, 2013.

STEINERT. **Steinert WDS Magnética via-úmida.** 1 ed. Köln: Steinert, 2022.

SWINDERMAN, R.T. **CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association) - Belt Conveyors for Bulk Materials.** Channers Publishing Company, Inc. 6 th edition, p. 567, 2007.

WEBB, C.; SIKORSKA, J.; KHAN, R. N.; HODKIEWICZ, M. Developing and evaluating predictive conveyor belt wear models. **Data-Centric Engineering**, [s. l.], p. 1-17, 28 jan. 2020.

WEIR MINERALS AUSTRALIA. **Cavex® Hydrocyclones.** 1 ed. Sydney: Weir Minerals, 2016.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A. **Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.** 8. ed. UK: Elsevier, 2016. 498 p. ISBN 978-0-08-097053-0

ZUCHERATTO JÚNIOR, N.L. **Revisão bibliográfica sobre segurança em barragens de terra por meio de instrumentação geotécnica.** 2021. 46 f. Monografia – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.